INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Junio 2011 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

NEUROCIENCIA

Uso judicial de escáneres cerebrales

SERPIENTES

Estrategias avanzadas de caza

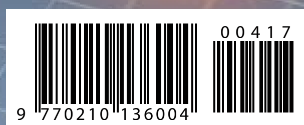
TERREMOTOS

Redes de alerta sísmica

La inflación a debate

Profundas grietas en sus cimientos lógicos cuestionan la validez de la cosmología moderna





6,00 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

LA INFLACIÓN A DEBATE | REDES DE ALERTA SÍSMICA | USO JUDICIAL DE NEUROIMÁGENES

N.° 417

JUNIO 2011

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA
Junio 2011, Número 417

76

ARTÍCULOS

KENNETH C. CATANIA


6


44

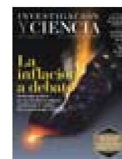

92

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

La teoría de la inflación cósmica, uno de los pilares de la cosmología moderna, afirma que la homogeneidad del universo a gran escala se debe a un período de expansión hiperacelerada que habría «estirado» el cosmos justo después de la gran explosión. Ahora, algunos expertos refieren profundas inconsistencias lógicas en los cimientos de la teoría. Ilustración de Malcolm Godwin.





Octubre 2010

GEÓFITOS EN EL CABO

En el artículo «Cuando el mar salvó a la humanidad» [Investigación y Ciencia, octubre de 2010], Curtis W. Marean describe las investigaciones que, junto a su grupo, llevó a cabo en Pinnacle Point, en Sudáfrica. Señala que la vegetación actual de esa región es muy variada e incluye un gran número de especies caracterizadas por tubérculos y bulbos comestibles, esto es, geófitos.

La vegetación en cualquier zona de la Tierra es dinámica, no estática. Cambia a medida que lo hacen el clima y otros factores que no comprendemos. ¿Por qué, habida cuenta de ese dinamismo, podemos suponer que los geófitos también abundaban en la región hace 200.000 años?

Frank Reichenbacher
Scottsdale, Arizona

Responde Marean: *La presencia de una planta geófita suele asociarse con una adaptación a veranos secos y cálidos, así como a climas áridos. Pero ese no es el caso de los geófitos de la región de El Cabo, ya que su centro se encuentra dominado por lluvias invernales. Toda la zona, lo que incluye el área de* fynbos *y el Karoo interior, presenta una variedad de geófitos extremadamente rica. A partir de otros indicadores, como la fauna de grandes mamíferos, la de micromamíferos o los espeleotemas, podemos afirmar con seguridad que durante los últimos 200.000 años el clima de El Cabo ha sido propicio para los geófitos, incluso bajo las condiciones glaciales más severas. De hecho, El Cabo fue con toda probabilidad más seco durante las glaciaciones, por lo que los geófitos se habrían visto incluso más favorecidos que en la actualidad.*

POLIESTIRENO Y DIAMANTE

En el apunte «El diamante, ¿joya o mineral?», de Michael Moyer [Investigación y Ciencia, marzo de 2011], me ha sorprendido y desconcertado la equiparación del poliestireno (material orgánico, sintético, relativamente blando, degradable y combustible) con el diamante, el zafiro y la sílice, todos ellos materiales inorgánicos, muy duros y prácticamente indestructibles. El autor debería explicar qué propiedad del poliestireno le permite compararlo con los minerales citados.

Rafael Obeso
Monzón, Huesca

Responde Moyer: *La línea en cuestión («Un diamante es para toda la vida. Igual que el zafiro, la sílice y el poliestireno extruido») pretendía llamar la atención sobre el hecho de que el mensaje principal empleado por la industria del diamante bien podría aplicarse a materiales muy diversos. Es cierto que el poliestireno extruido representa un elemento curioso en la lista; aun así, tarda cientos de miles de años en descomponerse. Espero que fuesen más quienes encontraron la comparación divertida que quienes la hallaron problemática.*



Marzo 2011



Abril 2011

UN LENGUAJE, MUCHOS IDIOMAS

En el artículo «Lenguaje y pensamiento», de Lera Boroditsky [Investigación y Ciencia, abril de 2011], parece haber un importante error de traducción. En la versión publicada, los términos «lengua», «idioma» y «lenguaje» aluden indistintamente a un mismo concepto que, correctamente, solo puede ser llamado «lengua» o «idioma», pero en ningún caso «lenguaje». Lera Boroditsky se refiere en todo momento a los sistemas lingüísticos (lenguas) como estimuladores de la cognición humana, pero no a la capacidad comunicativa (lenguaje) que, como se sabe, es universal. Si se trata de un error de traducción, tal vez se haya debido a que en la lengua inglesa no hay distinción terminológica entre ambos conceptos (*language*), mientras que en las lenguas romámicas, y en particular en el español, esta sí existe.

Olga Ivanova
Salamanca

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

MICROBIOLOGÍA

Compartir por igual

Las bacterias y las arqueas, conocidas en conjunto como procariotas, viven casi en todas partes; se dividen sin ningún problema en lugares que van desde el medio ácido del estómago hasta las fuentes termales de las profundidades marinas. Prosperan en sitios tan diversos gracias a la extraordinaria flexibilidad de su genoma: pueden perder genes, alterarlos o duplicarlos casi a voluntad. Se sabe desde hace tiempo que los procariotas adquieren también genes de sus vecinos (una medida que contribuye a la resistencia a los antibióticos). Pero se consideraba que esa estrategia para obtener ADN nuevo, denominada transferencia horizontal de genes, sucedía escasas veces, solo bajo fuertes presiones ambientales, como la exposición a antibióticos potentes.

Un estudio reciente publicado en *PLoS Genetics* ha revelado, en cambio, que los procariotas adquieren genes de microorganismos cercanos con bastante frecuencia. La transferencia, que puede tener lugar cuando un microbio obtiene la información genética de otro a través de un intermediario o un virus, se produce incluso entre procariotas de diferentes especies.

Al compilar una base de datos de 110 genomas de procariotas distintos, Todd J. Treangen y Eduardo P. C. Rocha, del Instituto Pasteur de París, calcularon el número de genes que habían sido adquiridos mediante transferencia horizontal. Sabían que los genes que evolucionan dentro del genoma de un procariota suelen localizarse cerca de genes similares y presentan funciones parecidas a otros. Sin embargo, los genes que llegan por transferencia horizontal aparecen al azar por todo el genoma y a menudo desempeñan funciones muy diferentes. Mediante el análisis de estos dos marcadores importantes, Treangen y Rocha calcularon que los procariotas estudiados habían adquirido entre el 88 y el 98 por ciento de los nuevos genes a través de la transferencia horizontal.

«El estudio demuestra que, en las bacterias, la mayor parte de los genes nuevos proceden de fuentes externas», afirma Howard Ochman, microbiólogo de la Universidad de Yale que no participó en la investigación. Según él, los investigadores debieron obtener la secuencia completa de varios genomas y emplear una buena dosis de sentido común para seleccionar los datos, gracias a lo cual extrajeron conclusiones realmente sólidas.

Cuando alcanzan su nuevo hogar, los genes transferidos siguen un camino evolutivo diferente al de los genes del genoma que los acoge. Los recién llegados evolucionan más deprisa y son más duraderos; Treangen sospecha que esa conducta se debe a que los genes proporcionan una funcionalidad totalmente nueva y útil.

La transferencia horizontal de genes permite a los procariotas adquirir adaptaciones preexistentes de otros microorganismos, según Treangen, lo que les facilita el establecimiento en nuevos ambientes. Su estudio, afirma, demuestra que la transferencia horizontal constituye la fuerza dominante en la evolución de los procariotas y ayuda a explicar la rápida aparición en las bacterias de resistencias a antibióticos. *—Carrie Arnold*

HISTORIA DE LA TÉCNICA

Las primeras grabaciones sonoras

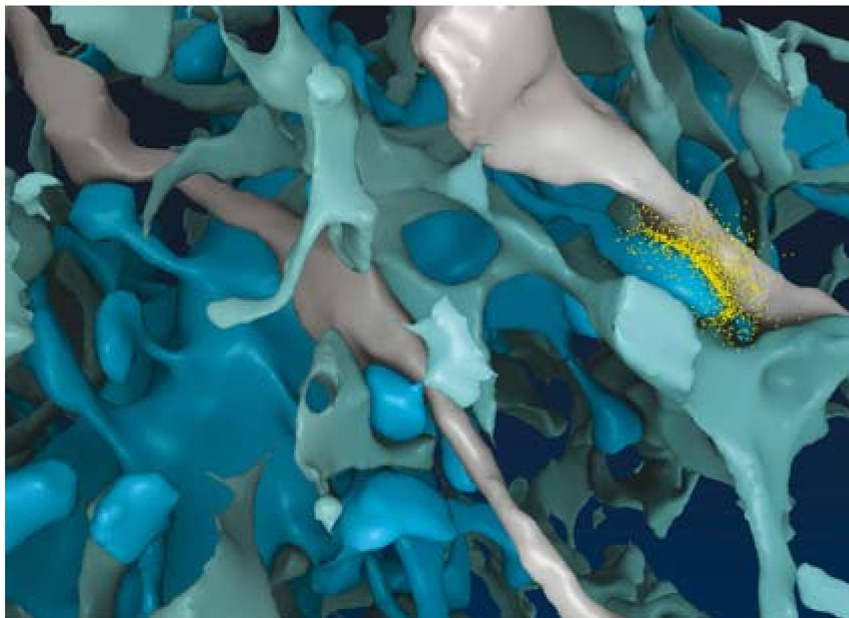
En el siglo IX, unos sabios persas inventaron el primer instrumento mecánico conocido: un órgano que, movido por agua, reproducía la música impresa en un cilindro giratorio. Habrían de pasar 1000 años hasta que alguien alumbrase el proceso inverso: transcribir sonidos sobre una superficie.

La primera máquina que registró música del aire fue el fonoautógrafo, creado en 1857 por Édouard-Léon Scott de Martinville. El aparato empleaba un cuerno para concentrar el sonido y dirigirlo hacia un pequeño diafragma, desde el que una aguja registraba las ondas sonoras sobre un cilindro de vidrio giratorio recubierto de hollín. Aunque el dispositivo demostró la posibilidad transcribir señales acústicas, no servía para reproducir los sonidos grabados. (Al menos hasta 2008, cuando investigadores del Laboratorio Nacional Lawrence, en Berkeley, descifraron el rayado y resucitaron un registro de 1860 en el que una voz femenina cantaba *Au clair de la lune*.)

El fonoautógrafo de De Martinville quedó como una pintoresca curiosidad histórica, pero su diseño de bocina, diafragma, aguja y cilindro supuso el fundamento de toda grabación durante los 70 años siguientes. En 1874, Alexander Graham Bell experimentaba con un sistema muy parecido al de De Martinville, pero que empleaba la oreja de un cadáver. Después, sus esfuerzos se dirigieron al teléfono, ingenio que patentó en 1876. Un año después, Thomas A. Edison (*fotografía*) investigaba la posibilidad de registrar los sonidos del teléfono de Bell cuando se interesó por la posibilidad de grabar el sonido del aire. Su dispositivo, casi idéntico al de De Martinville, registraba las ondas acústicas en papel de aluminio, lo que sí permitía su reproducción posterior. En diciembre de 1877, el mismo mes en que lo patentó, llevó el fonógrafo a las oficinas de *Scientific American* y escribió: «No importa lo familiarizado que pueda estar alguien con las máquinas modernas y sus maravillosas prestaciones... le será imposible escuchar el habla mecánica sin que le asalte la idea que sus sentidos lo están engañando». *—Michael Moyer*



WALTER HODGES, *CORBIS* (*arriba*), GRANGER COLLECTION (*abajo*)



NEUROCIENCIA

Señales en una tormenta

Si pudiésemos detener el tiempo por un instante y hacernos lo suficientemente pequeños como para poder distinguir las moléculas cuando una neurona se comunica con otra a través de una sinapsis (el punto de contacto entre ambas) apreciaríamos lo que se observa en la parte derecha de la imagen. La forma en que el cerebro siente, piensa, aprende y expresa las emociones depende del modo en que se transmiten señales las neuronas. De ahí que numerosos laboratorios trabajen febrilmente para comprender el funcionamiento de las sinapsis y la manera en que los medicamentos psiquiátricos, que actúan sobre ellas, mejoran la vida de los pacientes.

Sin embargo, los avances de los neurólogos se topan con grandes dificultades a causa de la enorme complejidad de las sinapsis, de un tamaño inconcebiblemente pequeño y una rapidez extrema. Gracias a los esfuerzos coordinados de más de 1400 tipos de moléculas, una neurona se comunica con otra mediante la liberación de neurotransmisores. Estos atraviesan el estrecho espacio hasta llegar a la superficie receptora de la célula vecina. La única forma de conocer en profundidad lo que sucede en una sinapsis consiste en desarrollar un modelo por ordenador lo más realista posible. Se confía en que al ejecutar una simulación momento a momento y molécula a molécula se obtengan nuevos datos que, posteriormente, se puedan comprobar de forma experimental.

La imagen generada por ordenador de la figura, creada por el grupo de Tom Bartol, del Instituto Salk de Estudios Biológicos, constituye un primer paso. Representa una pequeña parte de una reconstrucción tridimensional, realizada durante cuatro años, de un minúsculo cubo de tejido nervioso perteneciente a un cerebro de rata. Además de la estructura, la imagen recoge el momento en que una neurona se comunica con otra (*derecha*). Las moléculas de neurotransmisor (*amarillo*) irrumpen en el espacio de sinapsis, el punto de contacto entre un axón de la célula señalizadora (*gris*) y una dendrita de la célula receptora (*azul*). (La estructura de color verde azulado corresponde a una célula que ayuda a que las neuronas desempeñen su función normal).

La simulación de Bartol ha permitido realizar una importante observación: una quinta parte del volumen de esa región del cerebro corresponde a todo el espacio que separa las células vecinas entre sí; un espacio por el que, según parece, los neurotransmisores se propagan extensamente. Esta vasta difusión contradice la imagen estándar de la sinapsis como un lugar donde únicamente se comunican dos neuronas y podría alterar nuestros conocimientos sobre el modo en que se transmite la información en el cerebro.

—Carl Schoonover

IMAGEN GENERADA POR TOM BARTOL, INSTITUTO DE ESTUDIOS BIOLÓGICOS DE SALK EN COLABORACIÓN CON JUSTIN KINNEY, DAN KELLER, CHANDRA BAJAJ, MARY KENNEDY, JOEL STILES, KRISTEN HARRIS Y TERRY SEJNOWSKI; DAVID RUANO/TNC (*Copenhaguen*)

AGENDA

CONFERENCIAS

17 de junio
Lenguaje y cerebro: ¿de dónde vienen las palabras cuando hablamos?
F. X. Alario, Laboratorio de Psicología Cognitiva del CNRS
Ciclo «Desafíos del siglo xxi»
Residencia de Investigadores del CSIC
Barcelona
www.residencia-investigadors.es

24 de junio
Avances en biología molecular
Rafael Yuste, Universidad Columbia (Nueva York)
Centro de Biología Molecular Severo Ochoa
Madrid
www2.cbm.uam.es

EXPOSICIONES

El cuerpo humano. Como soy yo
Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña
Terrassa (Barcelona)
www.mnactec.cat

Del 3 al 26 de junio
FOTCIENCIA8
Palacio Abacial
Alcalá la Real (Jaén)
museoalcalalareal.com

OTROS

Hasta el 5 de junio - Teatro
Copenhaguen, de Michael Frayn
Teatro Nacional de Cataluña
Barcelona
www.tnc.cat/es/copenhaguen



Del 20 al 25 de junio
Festival STARMUS de astronomía y música
En honor a Yuri Gagarin
Tenerife
www.starmus.com

Del 27 de junio al 1 de julio
4º Campamento internacional de cielos oscuros
Parque Astronómico Montsec
Cellers (Lérida)
www.darkskyparks.org

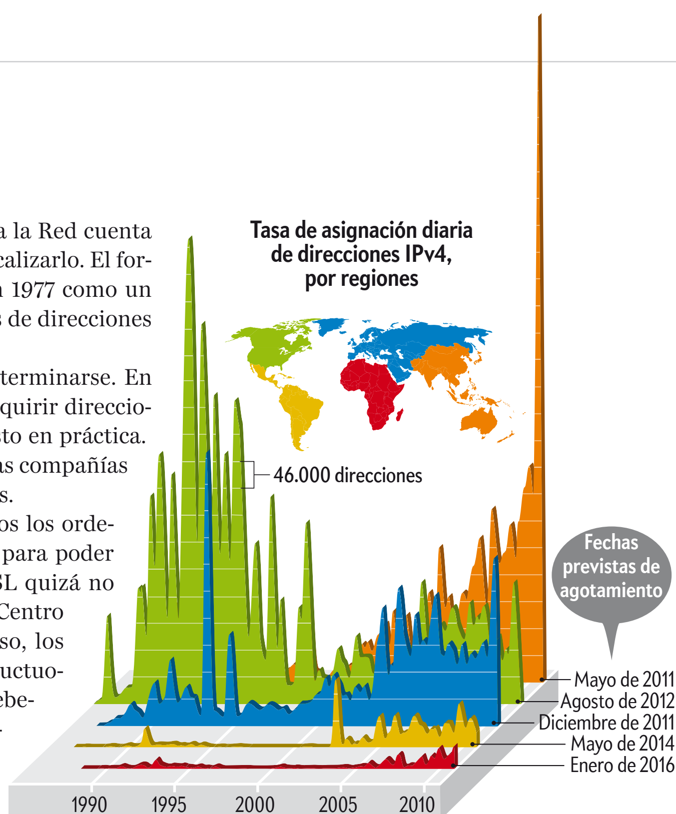
INTERNET

¿Se detendrá la Red el 8 de junio?

Cada ordenador, módem, servidor o teléfono que se conecta a la Red cuenta con una dirección de protocolo de Internet (IP) que permite localizarlo. El formato de esa dirección, conocido como IPv4, fue tipificado en 1977 como un número binario de 32 dígitos. Ello permitía casi 4300 millones de direcciones (2^{32}), una cifra que en aquel momento se antojaba ilimitada.

Ahora, las direcciones IPv4 disponibles están a punto de terminarse. En los últimos años, las empresas del sector han comenzado a adquirir direcciones IPv6, un protocolo de 128 dígitos que aún no ha sido puesto en práctica. Pero eso cambiará el 8 de junio: ese día, Google, Comcast y otras compañías activarán las direcciones IPv6 durante una prueba de 24 horas.

Es probable que la transición no ocasione problemas. Todos los ordenadores, salvo los más antiguos, se encuentran configurados para poder emplear ambos protocolos. Pero los módems por cable o DSL quizá no estén preparados, afirma Geoff Huston, director científico del Centro de Información de Red de la región Asia-Pacífico. En tal caso, los intentos para conectarse a una dirección IPv6 resultarían infructuosos o sufrirían retrasos. Durante algunos años, las empresas deberán emplear ambos formatos, lo que podría enlentecer el servicio. «Antes o después, el IPv6 llegará a ser el formato dominante», señala Huston. Sin embargo, cuándo llegará ese día es algo que aún no sabemos. *—Mark Fischetti*



¿QUÉ ES ESTO?

Lo que a simple vista aparenta una mota de polvo, bajo un microscopio resulta mucho más interesante. A cincuenta aumentos, la casi invisible *Daphnia*, una pulga de agua, aparece con «cabellera», grandes ojos y «labios» rojos. Kevin Mackenzie, director del departamento de microscopía e imágenes de la Universidad de Aberdeen, en Escocia, fotografió este invertebrado de charca de dos milímetros de longitud, cuya cabellera corresponde, en realidad, a antenas. El lunar situado debajo de su ojo compuesto (*negro*) es un ocelo, un órgano sensible a la luz. El cuerpo transparente de la pulga también revela su última comida: algas (*verde*).

En febrero, un grupo de científicos afirmaron haber secuenciado el genoma de una especie de pulga de agua, *Daphnia pulex*. La secuenciación ayudará a estudiar la forma en que el entorno influye sobre el funcionamiento de los genes, según el director del proyecto, John Colbourne, de la Universidad de Indiana. Hace tiempo que las autoridades municipales monitorizan el tamaño de las poblaciones de *Daphnia* con el fin de identificar una posible contaminación del agua, porque la especie exhibe una sensibilidad extrema a la contaminación. El estudio de las alteraciones de la función génica, señala Colbourne, también proporcionaría nuevos indicios sobre el efecto de ciertos productos químicos en la salud humana. *—Ann Chin*

JEN CHRISTIANSEN (*gráfica*), FUENTE: GEOFF HUSTON *APNIC*; KEVIN MACKENZIE, UNIVERSIDAD DE ABERDEEN (*pulga de agua*)

BIOLOGIA MARINA

El nido de amor de las cacerolas



Carmela Cuomo pensaba que tenía el secreto al alcance de la mano, escondido en un acuario negro y somero del Laboratorio de Pesquerías Marinas de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano de EE.UU., en Milford, Connecticut. Los xifosuros, o cacerolas de las Molucas, que había recolectado del puerto de New Haven en 2000 se apresuraban en su ritual primaveral: excavaban agujeros en la arena, ponían huevos y los fecundaban. Intentaba conocer la combinación de luz, alimento y propiedades químicas que favorecían la cría en esos animales de 500 millones de años de antigüedad. Pero al año siguiente, antes de poder averiguarlo, los xifosuros dejaron de aparearse y el secreto se le escapó.

Cuomo, ambientóloga de la Universidad de New Haven, continuó buscando la respuesta durante diez años en los acuarios de Milford, en laboratorios de su universidad y en una serie de acuarios en el sótano de su casa. Ahora, finalmente, ha empezado a desentrañar el misterio.

La resolución de esa incógnita tendrá implicaciones prácticas importantes. Nadie, como no sea por accidente, ha conseguido que las cacerolas de las Molucas se apareen en cautividad. Si se ideara una manera de criarlos, las poblaciones naturales de estos arácnidos, distribuidas a lo largo de la costa atlántica de los Estados Unidos y en Asia oriental, se verían libres de la presión que sobre ellas se ejerce. Las industrias farmacéuticas y de productos médicos valoran estos artrópodos acorazados porque una sustancia coagulante que extraen de su sangre representa el estándar mundial para detectar las mortíferas bacterias gramnegativas. Sus huevos son también una fuente de alimento vital para las aves litorales migratorias. Y una enorme industria pesquera los utiliza como cebo.

Cuando las cacerolas de Cuomo no se aparearon en 2001, la investigadora se dedicó a reproducir las mareas, alterar el ángulo de sus playas artificiales y cambiar el alimento de los animales. Cada año modificaba los parámetros, pero nada funcionaba. Después, en 2007, en una conferencia internacional sobre cacerolas de las Molucas, Cuomo oyó que un anciano investigador japonés hablaba de criar a xifosuros en tierra extraída de la playa en la que se habían puesto los huevos. Se dio cuenta entonces del error de sus experimentos: no había empleado arena natal. El único año que había conseguido que los xifosuros se reprodujeran había tomado para su acuario la arena y los arácnidos del mismo lugar. Lo intentó de nuevo... y las cacerolas se aparearon, no solo en la estación habitual, a finales de primavera, sino hasta el mes de octubre. La investigadora ha repetido el proceso, con igual éxito.

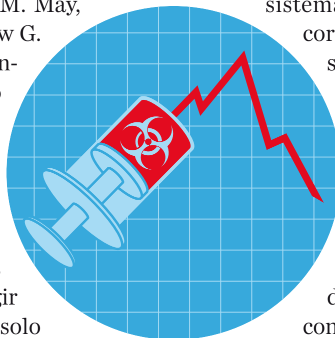
Ahora, impulsada por su curiosidad innata, Cuomo intenta desvelar otras incógnitas: ¿Qué hay en la arena que resulte tan importante para la reproducción de los xifosuros? ¿Cómo lo notan los animales? Y, por último, ¿puede ella ayudar a salvar a la especie?

—David Funkhouser

ECONOMÍA

Demasiado contagioso como para permitirse quebrar

¿Qué puede enseñarnos la epidemiología sobre la crisis financiera de 2008? Muchas cosas, según Robert M. May, ecólogo de la Universidad de Oxford, y Andrew G. Haldane, director ejecutivo de estabilidad financiera del Banco de Inglaterra. En un artículo reciente, han comparado los grandes bancos, como Lehman Brothers, con lo que los epidemiólogos llaman «superdiseminadores», personas u organismos infectados que ponen en peligro a poblaciones enteras.



Para evitar otro cataclismo bancario, los reguladores financieros podrían tener que dirigir su atención hacia la salud de las redes y no solo hacia la de cada uno de los bancos, señala May. Al preocuparse por el conjunto de conexiones que emana de las actividades financieras, los banqueros estarían siguiendo una senda que, entre otros, ya abrieron los informáticos para lograr sistemas modulares (en los que, gracias a la ayuda de cortafuegos, se evita que la infección en un elemento se propague por todo el sistema). Según Philip H. Dybvig, economista de la Universidad de Washington en San Luis, lo que proponen es, en realidad, una versión de la ley Glass-Steagall, una ley que separó los bancos de inversiones de los comerciales en EE.UU. y que fue revocada en 1999. ¿Toman nota los banqueros? May cita la llamada regla Volcker —propuesta hace poco a fin de blindar los fondos de alto riesgo y de capital privado con respecto a otras actividades bancarias— como una señal de que los banqueros pueden estar empezando a pensar como epidemiólogos.

—Carla Power

INGO ARNDT, MINDEN PICTURES (*arriba*); PHOTO RESEARCHERS, INC. (*abajo*)

Contador de anticoincidencias
Finalidad: Identificar las partículas que entran desde el lateral.
Diseño: Cilindro formado por 16 placas de un plástico centelleador que emite luz al paso de partículas cargadas.
Funcionamiento: Las partículas deben recorrer toda la longitud del instrumento para que todos los detectores reúnan los datos necesarios. Este dispositivo registra las partículas que entran desde un lado, de manera que el sistema de control pueda eliminar la señal que dejen en los restantes detectores.

Detector de radiación de transición
Finalidad: Distinguir entre partículas cargadas electromagnéticas y hadrónicas (electrones frente a antiprotones, o positrones frente a protones).
Diseño: 20 capas de tubos de deriva intercaladas con 20 capas de fibras de polietileno y polipropileno (radiador).
Funcionamiento: Cuando una partícula de masa baja atraviesa las fibras, emite rayos X; estos son detectados por la fila de tubos llenos de gas que se encuentran debajo.

Partículas con carga negativa

Partículas con carga positiva

Contador de tiempo de vuelo 2

Detector de radiación de Cherenkov RICH
Finalidad: Medir la velocidad y carga eléctrica de las partículas cargadas.
Diseño: Aerogel de silicio y fluoruro de sodio (radiador), plano de 680 fotomultiplicadores (10.880 fotosensores), reflector cónico.
Funcionamiento: La velocidad de la luz es un 5 por ciento menor en el aerogel que en el vacío y, en el fluoruro de sodio, un 23 por ciento más lenta. Cuando una partícula atraviesa un medio a una velocidad superior a la de la luz en dicho medio, emite un cono característico de radiación azulada, conocida como radiación de Cherenkov.

Calorímetro electromagnético
Finalidad: Medir la energía y dirección de las partículas electromagnéticas (electrones, positrones, fotones).
Diseño: Capas de láminas de plomo unidas con resina epoxi y con fibras ópticas incrustadas.
Funcionamiento: Cuando una partícula golpea contra el material, produce una cascada de partículas cuyo estudio permite identificar la partícula original. Al contrario que otros instrumentos, el calorímetro también registra partículas sin carga, como los fotones.

ALTAS ENERGÍAS

Un detector de partículas en el espacio

El experimento AMS estudiará los rayos cósmicos en busca de antimateria cósmica primaria, materia oscura y nueva física

Contador de tiempo de vuelo 1
Finalidad: Medir la velocidad y carga de las partículas.
Diseño: Láminas de un polímero transparente que brilla al paso de una partícula cargada.
Funcionamiento: Los detectores miden el tiempo que tarda una partícula en recorrer la longitud del instrumento.

Imán
Finalidad: Curvar la trayectoria de las partículas cargadas.
Diseño: Imán permanente con un campo de 0,15 tesla. Sustituye al imán superconductor criogénico del diseño original, lo que dotará al instrumento de un tiempo de vida mucho mayor.
Funcionamiento: Al pasar, las partículas se desvían hacia un lado u otro según el signo de su carga eléctrica.

Detector de trazas de silicio
Finalidad: Medir la carga y el momento de las partículas.
Diseño: Nueve planos de detectores de partículas.
Funcionamiento: Los detectores rastrean la trayectoria de las partículas cuando atraviesan el campo magnético.

ILUSTRACIÓN DE DON FOLEY, FUENTE PARA EL MODELO DE LA ISS: NASA



El pasado 16 de mayo partió desde Cabo Cañaveral con rumbo a la Estación Espacial Internacional (ISS) la misión STS-134 de la NASA, la última del transbordador espacial *Endeavour*. A bordo viajaba el Espectrómetro Magnético Alpha (AMS-02). Tres días después, el dispositivo era instalado con éxito en la ISS (*abajo*), donde permanecerá hasta que esta se retire de su órbita, en 2028.

El AMS-02 es un detector de partículas —un dispositivo como los empleados en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN— adaptado al agresivo entorno espacial. Con un tamaño de 5 × 4 × 3 metros, unas 7,5 toneladas de peso y un consumo superior a los 2000 vatios (proporciones gigantescas para los estándares del programa espacial), su objetivo consistirá en estudiar los rayos cósmicos durante un largo período de tiempo. La ausencia de contaminación atmosférica de la que se beneficia la órbita de la ISS y la avanzada tecnología de los detectores del AMS-02 harán posible estudiar, con un detalle sin precedentes, la masa, carga eléctrica y energía de las partículas y núcleos atómicos que llegan a la Tierra desde el espacio exterior. Gracias a ello, se espera que el instrumento detecte trazas de antimateria cósmica primaria, señales de materia oscura y, tal vez, fenómenos nuevos, como la existencia de la denominada materia extraña.

Equipado con 300.000 canales electrónicos y 650 microprocesadores, el AMS-02 contará con una resolución espacial de 10 micrómetros y una resolución temporal de 150 picosegundos ($150\cdot10^{-12}$ segundos). El elemento principal del detector es un imán permanente, el cual envuelve a un avanzado detector de trazas compuesto por varios planos de sensores de silicio. La fiabilidad de los componentes y la redundancia de los elementos críticos son esenciales en todo instrumento espacial. En el AMS–02, diversos subsistemas complementarios, basados en principios físicos diferentes (radiación de transición, efecto Cherenkov, calorimetría, etcétera) proporcionarán medidas redundantes de las características de los rayos cósmicos que lo atraviesen.

La construcción del AMS–02 ha corrido a cargo de una colaboración internacional dirigida por el premio nóbel Samuel C. C. Ting, del Instituto de Tecnología de Massachussets. El proyecto, en el que han participado unos 600 expertos procedentes de 60 institutos y centros de investigación de 16 países, ha sido liderado por Estados Unidos, Italia, España, Alemania, Suiza, Francia, Taiwán y China.

La participación española ha sido coordinada por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT); en ella han tomado parte, además, el IAC, CEDEX e INTA, y las empresas CRISA-EADS e IberEspacio. Sus objetivos han sido varios. Por una parte, el diseño, construcción y validación del detector de radiación de Cherenkov RICH, encargado de medir con precisión la velocidad y la carga eléctrica de las partículas y núcleos atómicos. Nuestro grupo del CIEMAT dirigió todas las fases del proyecto; en particular, la integración con el resto del instrumental y las pruebas de funcionalidad y verificación de prestaciones. Nuestra colaboración también se encargó del diseño, construcción y validación del sistema electrónico de control del imán superconductor, la opción contemplada cuando el proyecto AMS fue aprobado en 1995. Ello limitaba tres años el tiempo de permanencia del instrumento en la Estación Espacial, por lo que después se optaría por el imán permanente. No obstante, la experiencia acumulada en criogenia y

superconductividad será de gran utilidad para el desarrollo de futuras misiones espaciales tripuladas de larga duración. Por último, nuestro grupo ha contribuido a la gobernanza de la colaboración AMS al asumir la responsabilidad de las relaciones con otras instituciones, en particular con el CERN, lo que permitió su integración en este organismo, la construcción del centro de operaciones y control, así como el del equipamiento de un centro de operaciones científicas.

El Espectrómetro Magnético Alpha permitirá investigar cuestiones científicas de máxima relevancia, algo solo posible gracias a su potente y robusta instrumentación y a las condiciones experimentales óptimas que ofrece el entorno de la Estación Espacial Internacional. Con él se inicia una nueva era en el estudio de la radiación cósmica cargada que, confiamos, conducirá a la obtención de resultados científicos tan relevantes como los hallados con la componente neutra de la misma.

—Manuel Aguilar Benítez de Lugo
y grupo AMS del CIEMAT
Departamento de investigación básica
CIEMAT, Madrid

LA JOYA DE LA CORONA DE LA ESTACIÓN ESPACIAL

Construir el detector de rayos cósmicos más avanzado del mundo ha costado 16 años y unos 1500 millones de euros. Sin embargo, hasta hace no mucho parecía que acabaría olvidado en un almacén: la NASA, que tenía en mente terminar la construcción de la Estación Espacial Internacional (ISS) y jubilar el transbordador hacia finales de 2010, sostuvo en un principio que no había hueco en el calendario para acomodar el lanzamiento del detector. Fue necesaria una campaña de presión por parte de los físicos y la intervención del Congreso estadounidense para extender el programa del trasbordador.

Ningún otro instrumento cuenta con una combinación de detectores que permita medir todas las propiedades de las partículas: masa, velocidad, tipo y carga eléctrica. Su predecesor es el experimento PAMELA, puesto en órbita en 2006 por un consorcio europeo. PAMELA ha detectado lo que podrían constituir indicios de materia oscura y otros fenómenos exóticos, pero sus descubrimientos adolecen de cierta ambigüedad, ya que el experimento no logra distinguir entre antipartículas de poca masa, como los positrones, y partículas ordinarias de masa elevada pero con la misma carga eléctrica, como el protón.

En un caso extraño de simbiosis, el AMS y la ISS han acabado por justificarse el uno al otro. La ISS proporcionará la gran potencia que requiere el instrumento y los desplazamientos orbitales necesarios. El espectrómetro, por su parte, aunque nunca podrá aplacar el escepticismo que muchos sienten hacia la estación, garantizará que gracias a ella se consigan resultados científicos de primer orden. Al igual que el Gran Colisionador de Hadrones del CERN sondea las profundidades de la naturaleza desde la Tierra, a partir de ahora el AMS hará lo mismo en órbita.

—George Musser



El pasado 16 de mayo, el transbordador espacial *Endeavour* **ponía rumbo hacia la Estación Espacial Internacional con el experimento AMS a bordo. Entre los objetivos del detector de rayos cósmicos más avanzado del mundo se incluye confirmar la existencia de materia oscura.**

FAUNA

La avutarda

Evolución y limitaciones de un peso récord entre las aves voladoras

Junto a la avutarda Kori, su pariente africana, y seguida de cerca por el cisne común y el cóndor de los Andes, la avutarda común es el ave voladora de mayor peso del planeta. Especies mayores, como el avestruz, ñandú, emú y casuario, sobreviven aún en las llanuras de Africa, Sudamérica y Australia, aunque, debido a su gran tamaño, han perdido ya la capacidad de vuelo. La avutarda común es además el ave de mayor dimorfismo sexual en peso: los machos alcanzan entre 11 y 12 kilogramos (en algunos casos superan los 15 kilogramos); las hembras no suelen pasar de los 5 kilogramos.

El gran tamaño de los machos de avutarda es el resultado de una intensa selección sexual, proceso evolutivo que les ha llevado a crecer hasta el límite de lo viable para poder seguir disfrutando de la posibilidad de volar y evitar así ser víctimas de sus grandes depredadores: las águilas, los lobos y el hombre. Mecanismos biológicos como la gran competencia entre rivales, o la cuidadosa elección de pareja por las hembras, han favorecido a lo largo de millones de años a los machos de mayor tamaño. Sin otro cometido que el de acaparar el mayor número de apareamientos con las hembras de la zona en la que viven, y en ausencia de defensas como las cuernas de los ciervos o los colmillos de focas y

NASA

elefantes, los machos de avutarda han desarrollado como única arma su propio peso, crítico en los combates cuerpo a cuerpo que tienen lugar en primavera, que pueden llevar al agotamiento físico, e incluso a la muerte, de uno de los contendientes. Menos de la mitad de los machos de un grupo reproductivo logrará fecundar alguna hembra; la mayor parte de estas serán cubiertas por solo unos pocos machos. Estos machos dominantes conservarán su rango de un año a otro, hasta que sus fuerzas flaqueen y algún individuo mejor preparado les arrebate el puesto en el grupo.

Como la naturaleza no acostumbra derrochar energía, ha provisto a los machos de avutarda de unas plumas especiales, las barbas, que crecen a ambos lados de la base del pico. La cantidad y longitud de las barbas informan a otros individuos del grupo acerca del peso y, por tanto, del poderío físico de su portador, lo que contribuye a evitar más combates de los estrictamente necesarios. Otras plumas de la base del cuello o gola son indicadoras de la edad, carácter aparentemente muy valorado por las hembras a la hora de elegir al que será padre de sus hijos. Padre solo biológico, ya que los cuidados de la prole recaerán exclusivamente en ella, sin participación alguna del macho, que abandonará la zona de reproducción tras las cópulas para reponer energías y prepararse para el siguiente ciclo reproductor.

Sin embargo, no todo podían ser ventajas. Un tamaño grande implica también inconvenientes, ya desde el nacimiento. El rápido crecimiento necesario para asegurar de adulto un tamaño máximo supone unas necesidades alimentarias que muchas veces la hembra no puede asegurar al polluelo. Ello determina una mayor mortalidad en los machos jóvenes respecto a las hembras jóvenes, una diferencia que se sigue manteniendo a lo largo de toda la vida, de entre ocho y diez años en promedio. A la madre le cuesta mucho más criar a un hijo que a una hija, pero el mayor coste de sacar adelante a un macho puede verse recompensado por un mayor número de nietos, si el macho resulta ser uno de los pocos exitosos.

El mayor tamaño de los machos también los obliga a abandonar en verano los lugares de cría excesivamente calurosos de la España mediterránea, para dirigirse a lugares más frescos y tranquilos del norte peninsular, con los riesgos que dichas migraciones conllevan. Tales riesgos quedan patentes en la mayor mortalidad del sexo masculino a lo largo de toda su vida, lo que determina que en todas las poblaciones de avutardas haya más hembras que machos. Entre las causas de mortalidad destaca la producida por choque contra tendidos eléctricos, hoy por hoy la causa de muerte más importante que amenaza a la especie. Las aves en vuelo no ven los cables, o los ven demasiado tarde, y colisionan contra ellos, quebrándose alas, patas o cuello, lo que finalmente les ocasiona la muerte. De nuevo, esta falta de maniobrabilidad resulta también más patente en los machos, debido a su mayor peso e inercia durante el vuelo.



C. PALACÍN

La compleja exhibición del plumaje durante el celo permite al macho de avutarda mostrar a los competidores su poderío físico. Las hembras valoran la calidad del macho basándose en el aspecto de su plumaje.

Amenazas y conservación

El tamaño de los machos los ha convertido desde antaño en apetecida presa de uno de sus principales depredadores, el hombre. Al principio, solo para aprovechar su abundante carne, como atestiguan las representaciones de esta especie entre las pinturas rupestres del gaditano Tajo de las Figuras, o los restos de hace 300.000 años hallados en Atapuerca. Más tarde, desde la aparición de las armas de fuego hasta la total veda de la especie a finales del siglo pasado, como trofeo cinegético. Ha sido la caza selectiva de los machos más grandes, los *barbones*, la que probablemente ha contribuido en numerosos casos no solo a una eliminación de los adultos más vigorosos y de mayor edad, los preferidos por las hembras, sino a la total extinción de grupos enteros. En la actualidad, el relevo de esta antigua amenaza lo han tomado las transformaciones agrícolas y los abusos del medio por parte del hombre, en su desmedida expansión urbanística. A pesar de estas agresiones, que en Europa y Asia han acabado con muchos núcleos avutarderos, en España contamos aún con una población saludable (unos 30.000 individuos) que esperamos pueda sobrevivir a pesar del desarrollo humano.

Esos y otros datos sobre la biología de esta majestuosa especie son el resultado de un proyecto de investigación (www.proyectoavutarda.org) que viene desarrollándose desde hace dos décadas en el departamento de ecología evolutiva del Museo Nacional de Ciencias Natura-

les, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. El marcaje, a lo largo de estos años, de varios cientos de pollos con pequeños emisores de radio ha permitido el seguimiento de sus historias de vida y la obtención de valiosa información sobre su comportamiento social, migraciones, éxito reproductivo y causas de mortalidad.

La avutarda ha dejado de ser un codiciado trofeo de los cazadores de mediados del siglo pasado para constituir hoy una de las especies mejor conocidas de nuestra fauna. Confiemos en que este conocimiento sirva para garantizar la supervivencia de esta emblemática representante de nuestras llanuras cerealistas.

—Juan Carlos Alonso
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid

BOTÁNICA

La diversidad de las campanillas

La diversificación de estas plantas se halla ligada a los desplazamientos continentales y cambios climáticos sucedidos en el pasado

Las Campanuláceas, popularmente conocidas como campanillas, son una familia de plantas extendidas por todo el mundo. Habitan sobre todo en las regiones de clima frío y árido del hemisferio norte, y proliferan especialmente en las áreas montañosas. En primavera resulta habitual encontrar campanillas cuando caminamos por algún macizo ibérico. La mayoría de estas plantas son herbáceas o arbustivas. Se reconocen fácilmente por sus flores con forma de campana de color lila azulado, aunque hay algunas excepciones.

Linajes evolutivos

Un estudio reciente, basado en la comparación de secuencias de ADN, ha desentrañado las claves de la evolución de esta familia, que hoy presenta una notable diversidad y una amplia distribución. El origen de las Campanuláceas se hallaría en Asia, donde habrían empezado a diversificarse durante el Mioceno, hace más de 20 millones de años, época con un clima más frío y seco que el actual. Posteriormente, hace 16 millones de años, se habrían extendido hacia las praderas esteparias del continente africano, aprovechando una nueva ruta de dispersión creada por la colisión de la placa continental Eurasiática con la Arábiga.

Uno de los géneros más antiguos de las Campanuláceas, *Canarina*, presenta una distribución muy disyunta: por un lado, crece en las islas Canarias; por otro, en el este de África, en la región del Gran Valle del Rift. Esta curiosa distribución, que se repite en otras familias dispares de plantas, podría deberse a que los ancestros de estas especies ocuparon en el pasado un territorio mucho más extenso en África. Su área de distribución se habría reducido de

CORTESÍA DE CRISTINA ROQUET



Campanula alpestris, **especie endémica de los Alpes que crece solo en pedregales calcáreos de alta montaña.**



Campanula glomerata, **especie común que se encuentra en bosques y praderas de gran parte de Europa y se extiende hasta el centro de Asia.**

forma progresiva debido a la aridificación de la zona donde medran actualmente, el Sáhara (según estudios recientes, las condiciones desérticas en esta región datan como mínimo de 7 millones de años).

Motores de diversificación

Desde el norte de África, las Campanuláceas continuaron su expansión hacia la región mediterránea, la península de Anatolia y el Cáucaso. Los estudios indican que un acontecimiento geológico drástico en la región mediterránea resultó clave en la aparición de nuevas especies de *Campanula*, el principal género de la familia: la crisis salina del Mesiniense, hace unos 6 millones de años. Este fenómeno consistió en la desecación casi completa del mar Mediterráneo durante unos 700.000 años, debido al cierre temporal del estrecho de Gibraltar. Al superar la evaporación a la precipitación y al agua recogida por los ríos que desembocaban en el mar, el Mediterráneo, sin conexión con el océano Atlántico, se fue secando progresivamente. Durante este período, los procesos de sequía y erosión en la región mediterránea se intensificaron y promovieron la aparición de nuevas especies, adaptadas a las condiciones áridas y a los hábitats perturbados. En el género *Campanula*, el aumento de la diversificación asociada a esa época fue notorio.

Por otro lado, la intensa actividad orogénica en los últimos 10 millones de años en la región oriental de la cuenca mediterránea (península Balcánica) y la región del sudoeste asiático (península de Anatolia, Cáucaso) ejerció un efecto importante en la diversificación. Tan solo en estas dos regiones existen cerca de 280 especies de campanuláceas, con un gran número de endemismos.

En conclusión, los cambios climáticos pasados y las expansiones de las regiones montañosas en los últimos 20 millones de años han desempeñado una función clave en la diversificación de las Campanuláceas, familia con un gran número de especies adaptadas a hábitats fríos, áridos o perturbados.

—Cristina Roquet
Dpto. de biología animal, vegetal y ecología
Universidad Autónoma de Barcelona

OCEANOGRAFÍA

Debajo de la zona del mínimo de oxígeno

A pesar de su hostilidad, este medio ha sido colonizado por casi todos los grupos faunísticos que conocemos del margen continental

Las zonas profundas (por debajo de los 200 metros) representan más del 90 por ciento de la superficie total de los mares y océanos. Sin embargo, son las menos exploradas. Ello se debe, sobre todo, a la dificultad técnica y al costo que entraña la realización de muestreos a estas profundidades.

En este mundo profundo, a veces llamado la «última frontera en la Tierra», la presión es muy elevada (puede llegar a 200 veces la presión atmosférica a 2000 metros), la luz natural totalmente ausente, las temperaturas muy bajas y la fuente de alimento principal consiste en la «nieve marina», materia orgánica que se hunde lentamente desde la zona fótica [*véase* «Vida en los abismos», por Craig McClain; Investigación y Ciencia, marzo de 2011]. No obstante, en algunas regiones del mundo, lo que limita la presencia de fauna es la ausencia o falta de oxígeno. La reducción de la concentración de oxígeno disuelto puede conducir a condiciones de anoxia (concentración inferior a 0,1 mililitros por litro de agua, o ml/l), hipoxia severa (entre 0,1 y 0,5 ml/l) o hipoxia moderada (entre 0,5 y 1,0 ml/l). A pesar de ello, este medio adverso ha sido colonizado por una rica macrofauna, que incluye la mayor parte de todos los grupos faunísticos que conocemos de las aguas más someras, cerca del margen continental.

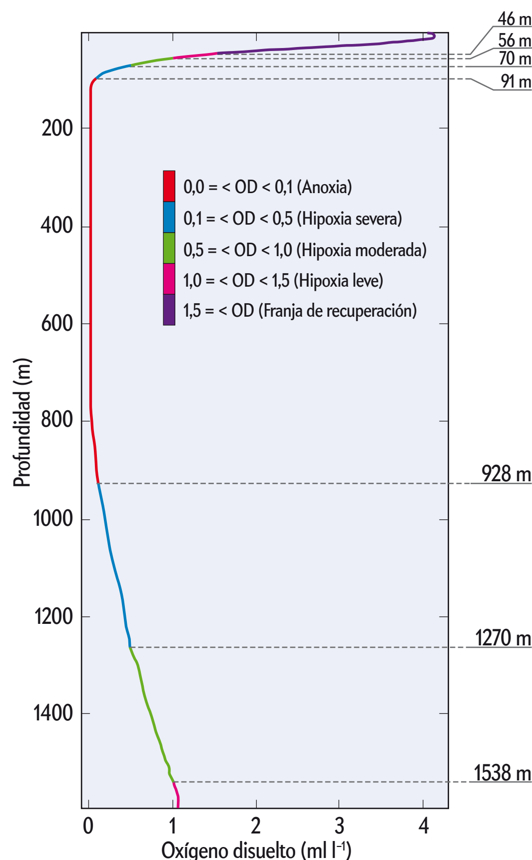
El Pacífico oriental

La zona del mínimo de oxígeno (ZMO) corresponde a las regiones oceánicas en donde la concentración de oxígeno disuelto es inferior a 0,5 ml/l. Suelen ser áreas con una productividad elevada en la superficie; los organismos al morir se hunden y degradan, con lo que se agota el oxígeno a lo largo de la columna de agua. El consumo de oxígeno por factores bio-

lógicos y su degradación por factores bioquímicos, asociado a la escasa circulación y al largo tiempo de residencia que presentan las aguas intermedias, constituyen las causas principales para la formación de la ZMO.

En el Pacífico Oriental, la ZMO es extensa. Ello se debe a que las aguas profundas intermedias presentan una movilidad escasa, no se han renovado por procesos de circulación y poseen una baja concentración de oxígeno en comparación con otras masas de agua que se originan cerca de la superficie. Se extiende de los ≈ 45º latitud norte a los ≈ 30º latitud sur; abarca casi en su totalidad la costa occidental de América. Se considera la ZMO más extensa del mundo. Su profundidad varía según la latitud. En el norte de California y Oregón se encuentra entre 500 y 600 metros; en México, en la zona central del golfo de California, a unos 250 metros; hacia el sur, frente a la costa de Acapulco, a 50 metros.

El espesor de la ZMO varía según la circulación y renovación de las aguas intermedias. En el litoral chileno, es inferior a 400 metros; en el Pacífico mexicano, excede los 1100 metros. De acuerdo con algunos autores, el espesor es mayor hacia el Pacífico Nororiental debido a que las masas de agua son «viejas» y presentan poco oxígeno en comparación con las del Pacífico Sur. Por arriba de la ZMO, el incremento de oxígeno se explica por el intercambio de gases con la atmósfera. Por debajo de la ZMO, el aporte de oxígeno se debe a la presencia de masas de agua frías que se originaron en la vecindad de los polos y cerca de la superficie, llevando consigo (debido a la circulación termohalina) importantes cantidades de oxígeno a grandes profundidades.

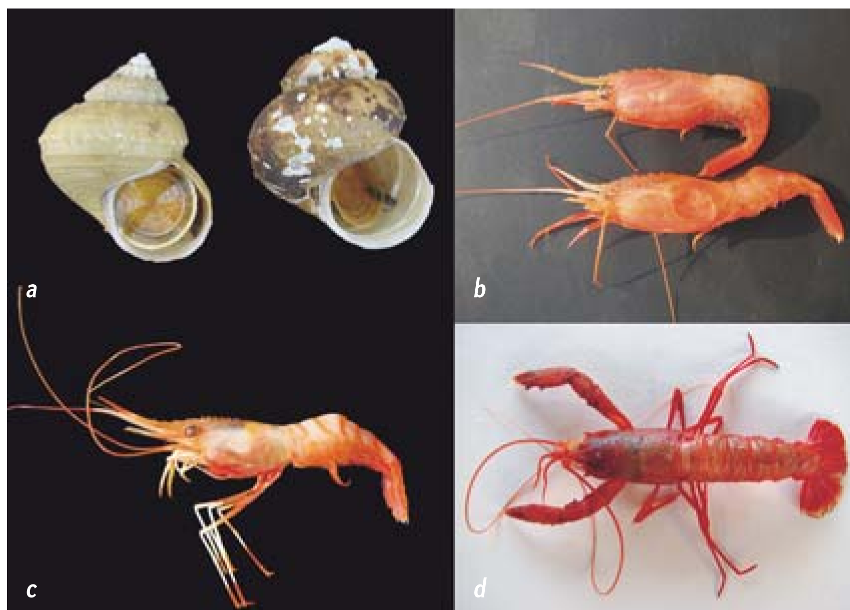


Perfil promedio de oxígeno disuelto (OD) obtenido a partir de las mediciones realizadas en doce estaciones del proyecto TALUD ubicadas entre 26º00' N y 23º03' N del Pacífico mexicano.

Fauna por debajo de la ZMO

Las aguas del Pacífico mexicano no escapan a este fenómeno. La ZMO representa un problema ecológico y económico de magnitud mayor. Por un lado, solo las especies que desarrollaron adaptaciones específicas para tolerar concentraciones bajas de oxígeno logran colonizar las franjas hipóxicas. Por otro lado, la extensión vertical de la ZMO (particularmente grande en el Pacífico mexicano) genera la existencia de una enorme zona prácticamente azoica (sin fauna) donde no hay cabida para la presencia de recursos pesqueros, sobre todo en el golfo de California y a lo largo de la costa del suroeste de México. En los años noventa, el Laboratorio de Invertebrados Bentónicos de la Unidad Académica Mazatlán dio comienzo al proyecto TALUD, el primer esfuerzo sostenido realizado por una institución mexicana para estudiar la biocenosis en aguas profundas del Pacífico oriental. Con un total de 13 cruceros efectuados entre 1990 y 2008, se recorrieron las zonas profundas del golfo de California y el litoral de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán y Guerrero. Para el registro de temperatura, salinidad y oxígeno en la vertical se empleó una sonda de conductividad, temperatura y profundidad (CTD, por sus siglas en inglés) con sensor de oxígeno integrado. Para la recolección de organismos se emplearon redes de patines y trineos bentónicos, nucleadores de caja, trampas y redes pelágicas.

Durante las 13 campañas se capturaron más de 250 especies de la macrofauna que medran justo por debajo de la ZMO: entre ellas 4 del orden Lophogastrida, 53 crustáceos decápodos, 56 moluscos y por lo menos 66 equinodermos. Dentro de estos tres últimos grupos se hallaron 11



Especímenes capturados en las campañas TALUD: (*a*) *Bathybembix bairdii* (Gastropoda); (*b*) *Heterocarpus affinis* (Caridea); (*c*) *Pandalopsis ampla* (Caridea); (*d*) *Nephropsis occidentalis* (Astacidea).

DAVID SERRANO (*gráfica*), MICHEL HENDRICKX (*moluscos y crustáceos*);





Recuperación de una sonda de conductividad, temperatura y profundidad (CTD, por sus siglas en inglés, *derecha*) a bordo de El Puma (*arriba*), el buque oceanográfico en el que se realizaron las campañas del proyecto TALUD.

UNAM (*El Puma*); CARLO M. ZÁRATE (*sonda*)

especies nuevas, de las cuales seis ya están descritas: *Odontozona foresti*; *Synallactes virgulasolida*; *Glyphocrangon taludensis*; *Bathione magnafolia*; *Mitsukuriella* sp. nov.; *Ypsilocucumis* sp. nov. Además, se consiguió una amplia serie de nuevos registros para México y el golfo de California, lo cual reviste un particular interés para estudios biogeográficos de estas comunidades. Se confirmó la presencia y abundancia de algunas especies de las que anteriormente se habían identificado uno o pocos especímenes. Se encontraron también especies de interés comercial: crustáceos decápodos como los camarones rojos *Heterocarpus affinis* y *Pandalus amplus*, la pequeña langosta *Nephropsis occidentalis*, el molusco *Bathybembix bardii* y la myxina (*Myxina circifrons*). Algunas especies (*H. affinis* y *P. amplus*) fueron capturadas también mediante trampas, un arte de pesca menos invasivo que los instrumentos de arrastre, que son poco selectivos y dañan los fondos.

A partir de las variables ambientales medidas (salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, materia orgánica y composición de los sedimentos) se analizaron las relaciones entre el medio y las comunidades naturales. Se observó una fuerte dependencia de estas últimas con la profundidad y los niveles de oxigenación.

Los resultados generados por el proyecto TALUD se complementaron con los datos existentes en la bibliografía. Se conformó así la base de información más importante del país para este tipo de ecosistema.

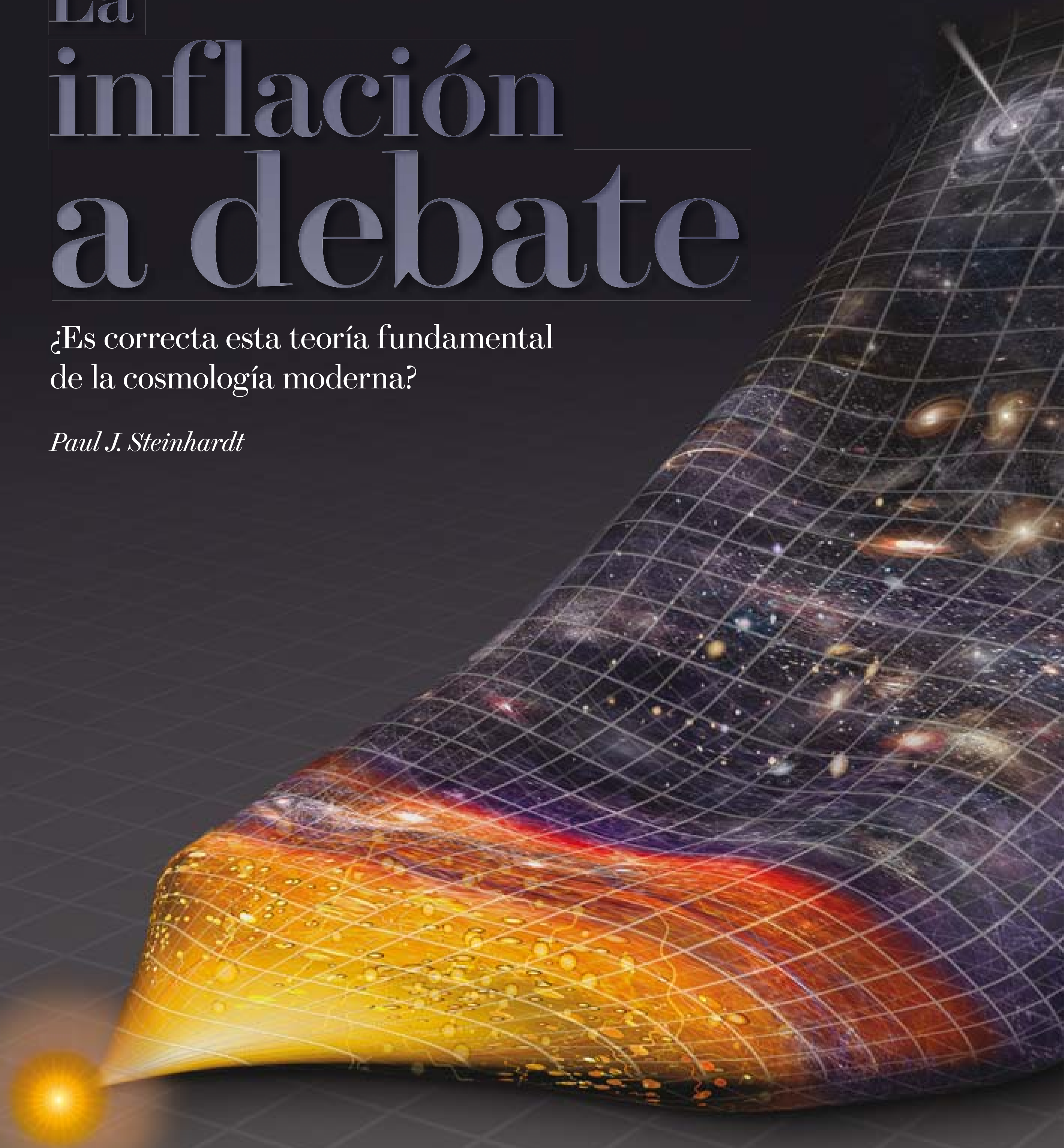
—David Serrano
Facultad de ciencias del mar
Universidad Autónoma de Sinaloa
México
Michel E. Hendrickx
Unidad Académica Mazatlán, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México

COSMOLOGÍA

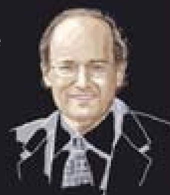
La inflación a debate

¿Es correcta esta teoría fundamental de la cosmología moderna?

Paul J. Steinhardt



Paul J. Steinhardt es director del Centro de Ciencia Teórica de la Universidad de Princeton. Es miembro de la Academia de Ciencias y en 2002 fue galardonado con la Medalla P. A. M. Dirac del Centro Internacional de Física Teórica Abdus Salam por sus contribuciones a la teoría inflacionaria. También es conocido por haber introducido el concepto de cuasicristal, un nuevo estado de la materia.



Hace treinta años, Alan H. Guth, por aquel entonces un afanoso estudiante postdoctoral en el Acelerador Lineal de Stanford, impartió una serie de charlas en las que introdujo la palabra «inflación» en el diccionario de la cosmología. El término hacía referencia a un breve período de expansión hiperacelerada del universo que, según él, pudo haber ocurrido durante los primeros instantes tras la gran explosión. Uno de esos seminarios tuvo lugar en la Universidad de Harvard, en la que también yo trabajaba como postdoctorado. La idea me cautivó de inmediato y, desde entonces, apenas he dejado de pensar en ella. Lo mismo le sucedió a un gran número de astrofísicos, expertos en gravitación y físicos de partículas. Hasta hoy, el desarrollo y la verificación de la teoría inflacionaria del universo han constituido una de las áreas más activas y exitosas de la investigación científica.

La propuesta inflacionaria nació para solucionar cierto defecto en la teoría original de la gran explosión. Según esta, el universo se ha ido expandiendo y enfriando poco a poco desde su comienzo, hace 13.700 millones de años. La teoría da cuenta de muchas de las características que observamos en el universo actual. Sin embargo, existe un problema. Para que todo funcione, el cosmos tendría que haber comenzado en un estado muy particular: debería haber sido extremadamente uniforme, con ínfimas variaciones en la densidad de materia y energía; además, su geometría inicial tendría que haber sido plana, lo que quiere decir que la curvatura del espaciotiempo no combaba las trayectorias de los rayos de luz ni las de los objetos en movimiento.

¿Cosmología deflacionaria? Los cosmólogos están reconsiderando si el universo realmente sufrió un espectacular «estirón» durante su juventud (*región amarillenta*), poco después de la gran explosión.

Pero ¿por qué el universo tendría que haber partido de un estado tan uniforme y plano? En principio, tales condiciones iniciales se antojan bastante improbables. Es aquí donde entra en escena la idea de Guth: según él, aunque el cosmos hubiese comenzado en el caos más absoluto —con una distribución de energía extremadamente inhomogénea y con una geometría muy retorcida—, un espectacular «estirón» en sus inicios habría dispersado la energía hasta distribuirla de modo uniforme y habría suavizado las irregularidades del espaciotiempo. Tras ese período inflacionario, el cosmos habría continuado expandiéndose al ritmo más moderado que predice la teoría original de la gran explosión. Solo que, ahora, las condiciones ya serían las necesarias para que las estrellas y las galaxias evolucionen hacia su estado actual.

La idea resulta tan atractiva que los cosmólogos —yo incluido— la explicamos a estudiantes, periodistas y al público en general como si se tratase de un hecho establecido. Sin embargo, algo muy extraño le ha ocurrido a la teoría inflacionaria desde que Guth la introdujese: a medida que han aumentado las pruebas a su favor, también lo han hecho los argumentos en contra. Estas dos posturas no gozan del mismo reconocimiento. Si bien las tesis a favor de la inflación resultan familiares para un gran número de físicos, astrofísicos y aficionados, somos muy pocos quienes nos hallamos al tanto de sus defectos y nos esforzamos por afrontarlos. La mayoría de los cosmólogos se ha dedicado a comprobar las predicciones del modelo inflacionario que aparecen en los libros de texto, pero han ignorado sus profundos inconvenientes con la esperanza de que, tarde o temprano, se verán resueltos. Por desgracia, los problemas del modelo inflacionario continúan sin desaparecer.

Como alguien que ha contribuido a la teoría inflacionaria [*véase* «El universo inflacionario», por Alan H. Guth y Paul J. Steinhardt; Investigación y Ciencia, julio de 1984] y también a sus alternativas, me encuentro dividido al respecto. Y tengo la impresión de que muchos de mis colegas de profesión tampoco saben a qué atenerse. Para escenificar nuestro extraño dilema, a continuación someteré a juicio a la cosmología inflacionaria. Actuaré primero como ferviente abogado defensor y presentaré las principales virtudes de la teoría. Después, con igual fervor, haré las veces de fiscal y expondré sus inconvenientes más serios.

EN DEFENSA DE LA INFLACIÓN

La teoría inflacionaria goza de tal popularidad que su defensa puede permitirse el lujo de ser breve. Apenas unos detalles más bastarán para apreciar por completo todas sus ventajas. La inflación se basa en un ingrediente particular: la energía inflacionaria. Combinada con la gravedad, esa energía provoca una expansión asombrosa del universo en un brevísimo lapso de tiempo. Durante ese período, la densidad de energía inflacionaria ha de alcanzar valores muy elevados y ha de permanecer casi constante. Su propiedad más insólita radica en que su gravedad ha de ser repulsiva, en lugar de atractiva. Es esa repulsión la que provoca que el espacio se hinche con tanta rapidez.

Lo seductor en la idea de Guth residía en que los físicos teóricos ya habían concebido múltiples posibilidades para esa clase de energía. El ejemplo principal lo proporciona un hipotético campo escalar (de espín cero), pariente lejano del campo magnético, que en los modelos inflacionarios recibe el nombre de *inflatón*. El bosón de Higgs, que en estos momentos se busca en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, deriva de otro campo escalar.

Como todo campo, el inflatón adquiere cierta intensidad en cada punto del espacio, la cual determina la fuerza que ejerce sobre sí mismo y sobre los otros campos circundantes. Durante la fase inflacionaria, la intensidad del inflatón es aproximadamente constante en todas partes. Por otro lado, la cantidad de energía que posee el campo (su energía potencial) depende de la intensidad. La función que determina la relación entre la energía potencial y la intensidad puede representarse en una gráfica. En el caso del inflatón, se supone que la curva se asemeja al perfil de un valle que yace al pie de una meseta de pendiente suave (*véase el recuadro* «El gran estirón»).

Como todo sistema físico, el inflatón tiende por sí solo a alcanzar el estado de menor energía potencial. Por tanto, si la intensidad inicial del campo se corresponde con uno de los puntos de la meseta, el inflatón perderá poco a poco intensidad y energía, al igual que si se deslizase por la pendiente hacia el valle. De hecho, las ecuaciones que rigen la evolución del inflatón resultan similares a las que dictan el movimiento de una bola que rueda por un terreno cuyo perfil coincide con el de la curva de energía potencial.

La energía potencial del inflatón puede provocar una expansión acelerada del cosmos. En el proceso, suavizaría y aplanaría el universo siempre y cuando el campo se mantuviera sobre la meseta el tiempo suficiente (unos 10^{-30} segundos) como para que el cosmos se expandiese, al menos, un factor 10^{25} en cada dirección. La inflación termina cuando el campo llega al final de la meseta y se precipita hacia el valle. En ese momento, su energía potencial se convierte en otras formas de energía más familiares —la materia oscura, la materia ordinaria y la radiación que llenan hoy el universo—. El cosmos entra entonces en un período de expansión modesta y decelerada, durante el que la materia se agrega para formar estructuras cósmicas, como las galaxias.

La inflación suaviza el universo del mismo modo en que al estirar una sábana elástica se alisan sus arrugas. Sin embargo, el resultado no es perfecto: quedan pequeñas irregularidades, debidas a efectos cuánticos. Las leyes de la mecánica cuántica dictan que un campo como el inflatón nunca puede adquirir exactamente la misma intensidad en todos los puntos, sino que debe experimentar fluctuaciones aleatorias. Estas provocan que la inflación termine en momentos ligeramente distintos en diferentes regiones del espacio, lo que se traduce en leves varia-

EN SÍNTESIS

La inflación cósmica goza de tal aceptación que, a menudo, se la considera como un hecho establecido. Según ella, a la gran explosión siguió un breve período de expansión descomunal, el cual habría sido el responsable de la planitud y uniformidad del universo.

Algunos de los padres de la teoría, entre quienes se incluye el autor, han comenzado a ponerla en tela de juicio. Profundas grietas en sus cimientos lógicos apuntan a que la teoría original debería ser reformulada o reemplazada por otra.

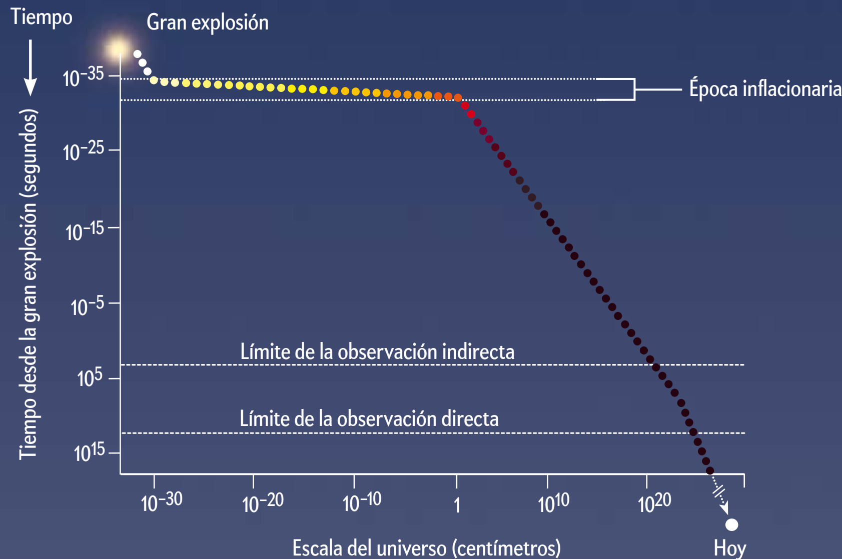
Hacen falta unas condiciones altamente improbables para desencadenar la inflación. Aún peor, la inflación debería continuar por toda la eternidad y engendrar infinitos universos, por lo que no realiza ninguna predicción observacional firme.

PÁGINAS ANTERIORES: MALCOLM GODWIN

El gran estirón

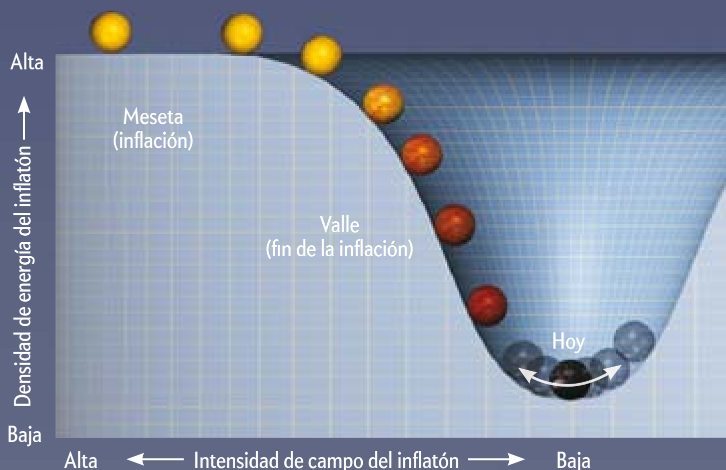
Las observaciones astronómicas indican que el universo se ha estado expandiendo durante 13.700 millones de años. Pero ¿qué ocurrió en sus primeros instantes, inaccesibles a la observación directa? La idea predominante, conocida como inflación cósmica, afirma que el universo aumentó bruscamente de tamaño durante sus inicios. Semejante «estirón» habría alisado las irregularidades del espaciotiempo, lo que explicaría su geometría actual. Solo habrían sobrevivido pequeñas inhomogeneidades, las cuales habrían engendrado las galaxias.

EFECTOS DE LA INFLACIÓN



La tasa de expansión es impresionante incluso para los estándares astronómicos: en 10^{-30} segundos, el universo aumentó su tamaño en un factor 10^{25} en cada dirección. Dicha expansión fue acelerada y apartó entre sí a regiones del espacio a velocidades muy superiores a las de la luz.

EL ORIGEN DE LA INFLACIÓN



El inflatón (un campo escalar, pariente lejano del campo magnético) habría generado una fuerza repulsiva que estiró el espacio con suma rapidez durante unos instantes. Para que eso ocurriera, la curva que determina la energía potencial del campo en función de su intensidad debe parecer una meseta a energías elevadas y un valle a energías bajas. El campo evolucionaría de igual manera que una bola que rueda cuesta abajo. En la meseta, ejercería una fuerza repulsiva; la inflación terminaría al llegar al valle.

Tiempo

El radio del universo era 10^{17} veces más pequeño que el de un átomo cuando empezó la inflación. Durante la época inflacionaria, creció hasta alcanzar el tamaño de una moneda. En los miles de millones de años que siguieron, el cosmos ha continuado expandiéndose, pero a un ritmo más pausado. Ello ha permitido la formación de estructuras cósmicas, como las galaxias.

MALCOLM GODWIN; JEN CHRISTIANSEN (*gráfica superior*)

ciones de temperatura entre unas zonas y otras. Esas inhomogeneidades habrían dado lugar a los primeros «grumos» que, después, evolucionaron hasta convertirse en estrellas y galaxias. Además, la teoría predice que esas variaciones han de ser aproximadamente invariantes de escala: no dependen del tamaño de la región, sino que ocurren con igual proporción a cualquier escala.

Los argumentos en defensa de la inflación pueden resumirse en tres dictámenes. Primero, la inflación resulta inevitable. Desde que Guth la propusiese, los avances en física teórica no han hecho más que alimentar la hipótesis de que el universo primitivo hubo de contar con el tipo de campos necesarios para la inflación. En las teorías unificadas, como la teoría de cuerdas, aparecen de manera natural cientos de candidatos para desempeñar el papel del inflatón. Y, en el caos primigenio, tuvo que haber alguna región en la que se dieran las condiciones necesarias para que la inflación comenzase.

Segundo, la inflación explica por qué el universo actual se muestra tan uniforme y plano. Nadie sabe qué aspecto tenía el cosmos tras la gran explosión, pero la inflación nos dice que no hace falta saberlo: con independencia de su estado inicial, el período de expansión acelerada lo estiró hasta que adoptó la apariencia correcta.

Tercero —y con toda probabilidad, el argumento más convincente—, la teoría inflacionaria realiza predicciones de gran alcance. Por ejemplo, los estudios sobre la radiación de fondo cósmico de microondas o sobre la distribución cósmica de galaxias han confirmado que las variaciones espaciales de energía en el universo primitivo fueron, en esencia, invariantes de escala.

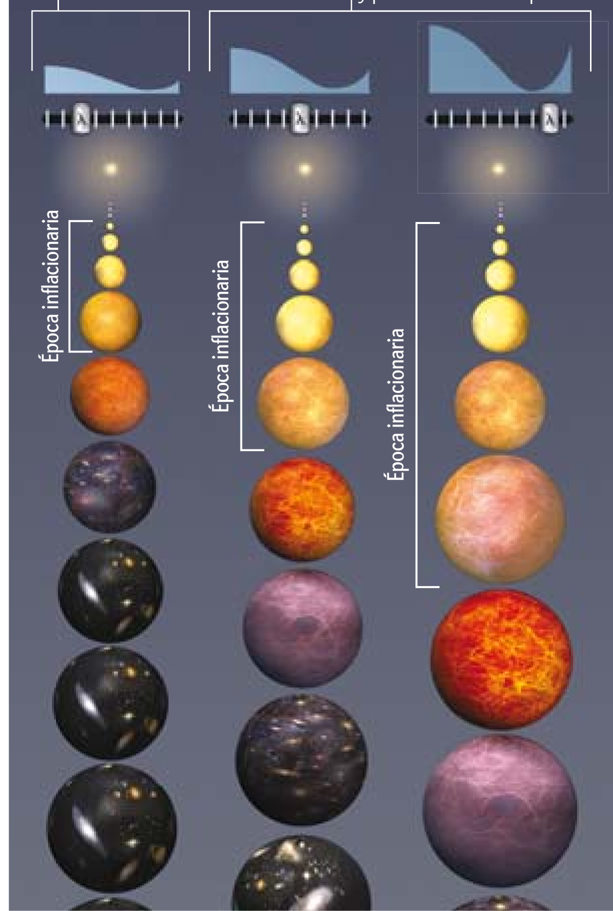
PROBLEMA 1: INFLACIÓN «MALA»

Difícil que acabe bien

Se supone que la inflación tendría que crear un volumen enorme de espacio que exhibiese de manera natural los rasgos de nuestro universo. Pero, a no ser que la curva de energía potencial del inflatón tenga una forma muy específica (la cual depende de varios parámetros, simbolizados aquí por λ), el resultado es «malo»: un volumen enorme, demasiado denso y con una distribución de galaxias errónea. Dada la gran posibilidad de valores de λ, una mala inflación se antoja mucho más probable que una buena.

Inflación «buena»: La densidad de galaxias observada solo se obtiene para unos pocos valores de λ.

Inflación «mala»: Un valor típico de λ produce una densidad de galaxias más alta y posiblemente más espacio.



MALCOLM GODWIN

CARGOS EN CONTRA

Cuando una teoría falla, los primeros síntomas suelen provenir de ligeras discrepancias entre sus predicciones y las observaciones. Sin embargo, este no es nuestro caso: todos los datos se hallan en el más exquisito acuerdo con las predicciones inflacionarias formuladas a principios de los años ochenta. En su lugar, las acusaciones contra la inflación se dirigen contra sus fundamentos lógicos. ¿Funciona la teoría según lo prometido? ¿Son las predicciones de los años ochenta las mismas que las de los modelos inflacionarios tal y como los entendemos hoy? Puede argumentarse que la respuesta a ambas preguntas es «no».

El primer dictamen afirma que la inflación es inevitable. Pero, entonces, aparece un corolario muy incómodo: una inflación mala resulta mucho más probable que una buena. Por «inflación mala» entendemos un período de expansión acelerada cuyo resultado no concuerda con las observaciones; por ejemplo, uno que genera fluctuaciones de temperatura demasiado acusadas. Que la inflación resulte buena o mala depende de la forma precisa que adopta la curva de energía potencial del inflatón. El perfil de esa función queda determinado por un parámetro numérico que, en principio, puede adoptar cualquier valor. El problema reside en que solo un minúsculo intervalo de valores reproduce las variaciones de temperatura observadas en el universo. En un modelo inflacionario típico, el parámetro debe ser del orden de 10^{-15}; esto es, cero hasta la decimoquinta cifra decimal. Una elección menos afinada, como cero hasta solo diez o doce cifras decimales, daría lugar a una mala inflación: el mismo grado de expansión acelerada (o mayor), pero con grandes variaciones de temperatura, incompatibles con las observaciones.

Podríamos ignorar la mala inflación si esta resultase incompatible con la existencia de vida. En tal caso, aunque semejantes variaciones de temperatura pudieran ocurrir, jamás las observaríamos. Este tipo de razonamiento se conoce bajo el nombre de principio antrópico. Sin embargo, aquí no se aplica: variaciones de temperatura más acusadas engendrarían un mayor número de estrellas y galaxias. El universo sería, si acaso, aún más habitable.

No solo resulta la mala inflación más probable que la buena, sino que una ausencia de inflación se antoja más probable que ambas. Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, ya apuntó esta posibilidad en los años ochenta. A partir de principios termodinámicos —análogos a los que se emplean para describir los estados de los átomos y moléculas en un gas—, contabi-

lizó las configuraciones iniciales posibles del inflatón y del campo gravitatorio. Algunas de ellas dan lugar a la inflación y, por tanto, a una distribución de materia muy uniforme y a una geometría muy plana. Pero otras producen un universo uniforme y plano sin necesidad de inflación. Ambos tipos de configuraciones son bastante excepcionales, por lo que un universo plano resulta, en general, improbable. Pero la impactante conclusión de Penrose fue que obtener un universo plano sin inflación era muchísimo más probable que con ella... ¡por un factor de 10 elevado a la gugolésima (10^{100}) potencia!

LOS PELIGROS DE UNA INFLACIÓN ETERNA

Una conclusión similar se obtiene al extrapolar la historia del universo desde su estado actual hacia atrás en el tiempo, empleando para ello las leyes físicas que conocemos. No existe una extrapolación única: dadas las condiciones actuales, gran cantidad de historias podrían haberlas precedido. En 2008, Gary W. Gibbons, de la Universidad de Cambridge, y Neil G. Turok, del Instituto Perimeter de Física Teórica, en Ontario, demostraron que un número abrumador de extrapolaciones conducían a una inflación insignificante, una conclusión compatible con la de Penrose. Ambas parecen poco intuitivas, puesto que un universo plano y uniforme se muestra muy improbable, y la inflación proporciona un mecanismo muy poderoso para obtenerlo. Pero esa ventaja se desvanece frente a lo complicado que resulta conseguir las condiciones necesarias para desencadenar la inflación. Una vez se tienen en cuenta todos los factores, es más fácil obtener un universo como el actual sin inflación que con ella.

Para gran cantidad de físicos, argumentos teóricos como los anteriores palidecen ante el magnífico acuerdo entre las predicciones de la teoría inflacionaria de los años ochenta y las observaciones cosmológicas actuales. La verificación experimental triunfa sobre cualquier razonamiento teórico. Pero lo curioso de la situación reside en que las predicciones de los años ochenta se basaban en una comprensión ingenua de la inflación; una que se ha mostrado errónea por completo.

El cambio de perspectiva empezó con la constatación de que la inflación es eterna: una vez iniciada, no se detiene jamás [*véase* «El universo inflacionario autorregenerante», por Andrei Linde; Investigación y Ciencia, enero de 1995]. Que la inflación se perpetúe a sí misma aparece como una consecuencia directa de la mecánica cuántica unida a una expansión acelerada. Recordemos que las fluctuaciones cuánticas podían retrasar ligeramente el final de la inflación. Allí donde las fluctuaciones sean pequeñas, también lo serán sus efectos. Pero, dado su carácter completamente aleatorio, habrá lugares en los que las fluctuaciones se tornen importantes y den lugar a retrasos sustanciales.

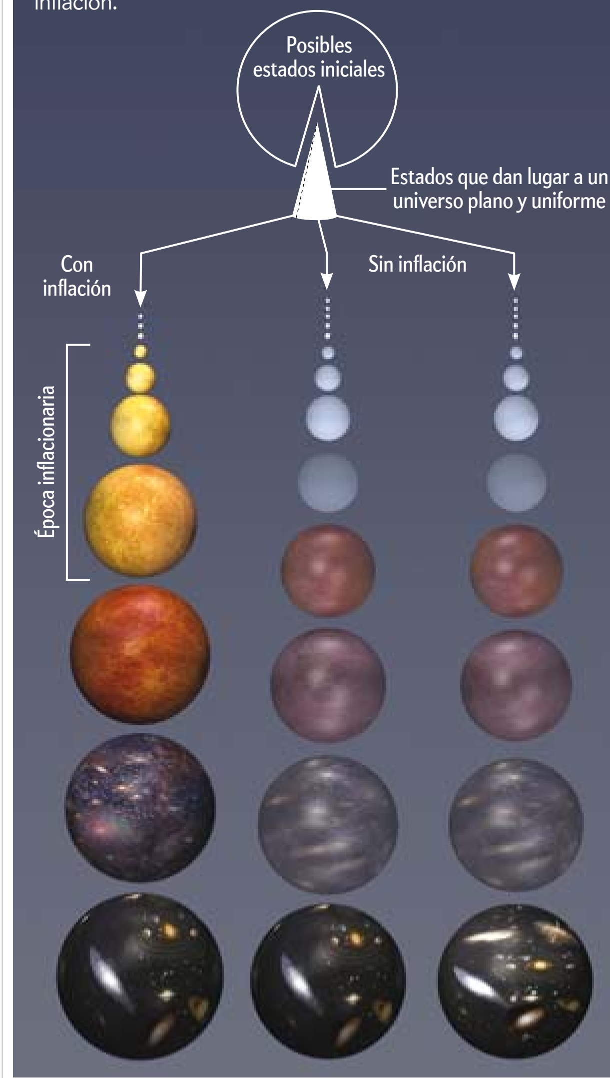
Esas regiones procrastinadoras resultan tan excepcionales que podríamos pensar en ignorarlas. Pero no podemos: esas zonas continúan expandiéndose al descomunal ritmo característico de la inflación, por lo que, en cuestión de un instante, sobrepasan en volumen a la región en la que la inflación acabó a tiempo. Emerge así un océano de espacio que se infla en torno a una isla diminuta de materia y radiación. Es más: las regiones procrastinadoras engendran a su vez otras y nuevas islas de materia —cada una de ellas, un universo autocontenido—. El proceso continúa hasta el infinito y crea un número ilimitado de islas rodeadas de un espacio cada vez más hinchado. Si esta idea no le provoca desasosiego, no se preocupe. Las noticias desagradables vienen ahora.

MALCOLM GODWIN

PROBLEMA 2: CONDICIONES INICIALES

Difícil de obtener

Se supone que la inflación debería ocurrir con independencia de las condiciones iniciales del universo. Pero un análisis más profundo indica que no es así. De todas las maneras en que podría haber comenzado el universo, solo una minúscula fracción acabaría en el estado uniforme y plano observado en la actualidad. Además, una abrumadora mayoría de ellas alcanzaría ese estado sin inflación significativa: solo una fracción infinitesimal de comienzos posibles produce un período de inflación.



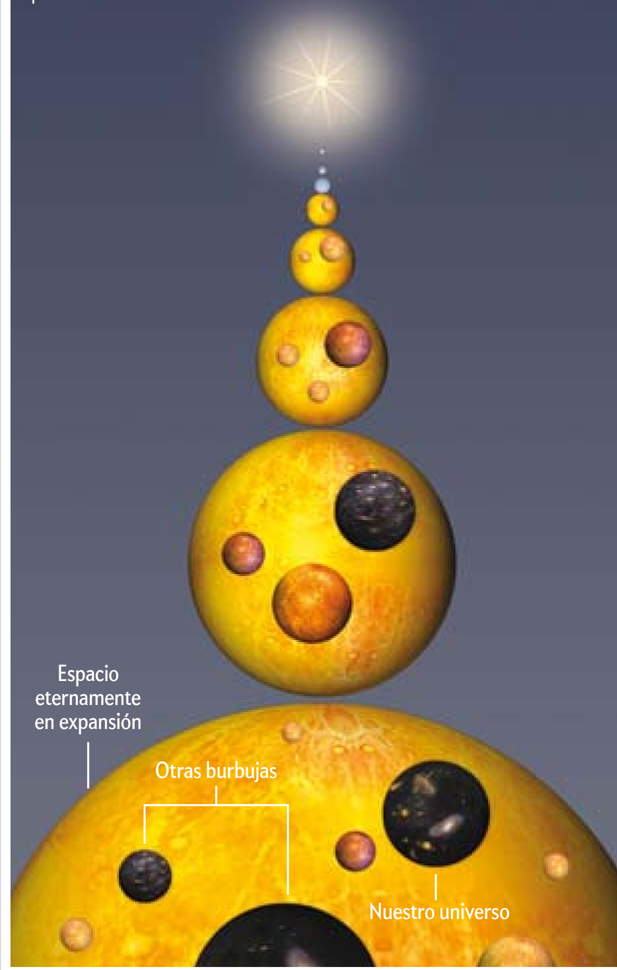
No todas las islas son iguales. La naturaleza aleatoria de la mecánica cuántica nos garantiza que algunas de ellas resultarán muy inhomogéneas o muy curvadas. Esta falta de uniformidad recuerda al problema de la mala inflación, pero su origen es bien otro. La mala inflación aparecía debido a que el parámetro que controlaba la curva de energía potencial del inflatón contaba con una alta probabilidad de alcanzar un valor demasiado elevado. Ahora, la falta de uniformidad se debe a la inflación eterna y las fluctuaciones cuánticas, lo cual ocurre para cualquier valor del parámetro.

Para ser exactos, en el párrafo de arriba, la palabra «algunas» debería sustituirse por «un número infinito». En un uni-

PROBLEMA 3: INFLACIÓN ETERNA

Cuando todo es posible

La inflación goza de fama por efectuar predicciones muy precisas que han sido verificadas por las observaciones. Pero ¿es en verdad así? Una vez que la inflación empieza, las fluctuaciones cuánticas la mantienen viva en la mayor parte del espacio. Allí donde acaba, condensa una burbuja de materia y energía. Nosotros vivimos en una de ellas, pero es atípica. De hecho, se forman infinitas burbujas con una infinita variedad de propiedades. Cualquier cosa que pueda ocurrir sucederá en alguna burbuja. Una teoría que predice cualquier cosa no predice nada.



verso con inflación eterna, infinitas islas se asemejarán a la nuestra, pero otro número infinito de ellas, no. El verdadero resultado de la inflación fue muy bien resumido por Guth: «En un universo con inflación eterna, todo lo que pueda llegar a ocurrir sucederá; de hecho, sucederá un número infinito de veces».

Así las cosas, ¿es nuestro universo la excepción o la regla? En un conjunto infinito de islas, resulta difícil de decir. Como analogía, imagine un saco lleno de monedas de oro y de plata. Si extrae una moneda al azar, podrá determinar con exactitud la probabilidad de que se trate de una de oro o una de plata. Pero, si el saco contiene un número infinito de monedas de cada tipo, ya no podrá calcular nada. Para evaluar las probabilidades, imagine que agrupa las monedas en dos montones: ponga primero una de plata en un montón; después, una de oro en el otro; luego, una de plata en el primero, etcétera. Tendrá la impresión de que el saco contiene el mismo número de monedas de cada tipo. Pero existe también la opción de ordenarlas de manera diferente: colocar diez monedas de oro en el primer montón, una de plata en el segundo, otras diez de oro en el primero, etcétera. Ahora le parecerá que hay diez monedas de oro por cada una plata.

¿Qué método cuenta las monedas de manera correcta? Ninguno. En un conjunto infinito, existen infinitas elecciones para ordenarlas y, por tanto, no hay forma legítima de juzgar qué tipo de moneda es más probable. De igual modo, resulta imposible decidir qué tipo de isla, uniforme o no, ocurre con mayor probabilidad en un universo con inflación eterna.

Ahora sí debería sentirse mal. ¿Qué significa que la inflación realiza una serie de predicciones —por ejemplo, sobre la uniformidad del universo o la invariancia de escala de sus fluctuaciones— si todo lo que puede ocurrir sucede un número infinito de veces? Y si una teoría carece de predicciones verificables, ¿cómo puede sostenerse, como suele hacerse, que se halla en acuerdo con las observaciones?

UNA MEDIDA DE NUESTRO FRACASO

Los físicos teóricos se hallan al tanto del problema. Sin embargo, confían en que podrán resolverlo y volver a la imagen ingenua de la década de los ochenta, que fue la que despertó su interés por la teoría. Numerosos expertos conservan esa esperanza, por más que, tras veinticinco años de lidiar con la cuestión, nadie haya aportado ninguna solución verosímil.

Algunos creen en la posibilidad de desarrollar teorías que, de algún modo, excluyan la inflación eterna, lo que atajaría el problema de raíz. Pero la eternidad aparece como una consecuencia de la inflación unida a la mecánica cuántica. Para evitarla, el universo tendría que haber comenzado en un estado muy especial, con una energía inflacionaria tal que la inflación terminase en todo punto del espacio antes de que las fluctuaciones cuánticas lograsen reavivarla. Sin embargo, en tales modelos el resultado depende de manera crucial de las condiciones iniciales, lo que contraviene el propósito original de la teoría: explicar el universo actual fuese cual fuese el estado en el que comenzó.

Una estrategia alternativa se basa en suponer que las islas similares a nuestro universo representarían el resultado más probable de la inflación. Los defensores de esta idea imponen lo que en jerga técnica se conoce como una *medida*: una regla que pondera la probabilidad de cada tipo de isla, algo así como aseverar que lo correcto es apilar tres monedas de oro por cada cinco de plata. No obstante, el concepto de medida supone un añadido *ad hoc*, una confesión pública de que, por sí sola, la teoría inflacionaria no explica ni predice nada.

Aún peor: se han propuesto diversas medidas igual de razonables pero con implicaciones diferentes. Un ejemplo lo encontramos en la medida de volumen, según la cual el peso relativo de cada isla debería corresponderse con su tamaño. A primera vista, la idea tiene sentido. A fin de cuentas, la idea de la inflación consiste en explicar la uniformidad y planitud observadas en el universo mediante un mecanismo que genere grandes volúmenes de espacio con esas propiedades. Por desgracia, la medida de volumen falla. Ello se debe a que favorece a las regiones procrastinadoras. Consideremos dos tipos de regiones: islas como la nuestra y otras que se formaron más tarde. Debido al crecimiento exponencial, estas últimas ocuparían un volumen total mucho mayor que las primeras y, por tanto, se-

MALCOLM GODWIN

rían muchísimo más comunes. Según esta medida, nuestra misma existencia sería harto improbable.

Los partidarios de introducir una medida adoptan una táctica de ensayo y error. Inventan y someten a prueba nuevas medidas con la esperanza de que, en algún momento, darán con aquella que produzca el resultado deseado: que nuestro universo cuenta con una gran posibilidad de existir y de ser como es. Pero supongamos que semejante empresa tiene éxito algún día. Entonces hará falta algún principio que justifique el empleo de esa medida frente a cualquier otra. Y después otro principio que justifique el anterior, y así sucesivamente.

Otra posibilidad consiste en acogerse al principio antrópico. Mientras que el concepto de medida intenta demostrar que vivimos en una isla típica, el principio antrópico supone que la nuestra constituye una isla excepcional, una en la que se dan las condiciones mínimas e indispensables para la vida. Otras islas más comunes no exhibirían las propiedades necesarias para formar estrellas, galaxias, ni ningún otro requisito para la vida tal y como la conocemos. Aunque esas islas típicas ocupen un espacio mayor que las similares a la nuestra, podríamos ignorarlas, ya que solo nos interesan aquellas con potencial para albergar vida.

Por desgracia, las condiciones que vemos en nuestro universo no son mínimas: este se muestra más plano, uniforme e invariante de escala de lo que sería imprescindible para permitir la aparición de vida. Islas más típicas, como aquellas más jóvenes que la nuestra, resultan casi igual de habitables y abundan mucho más.

PENALIZAR LA PROCRASTINACIÓN

A la luz de los argumentos anteriores, la tan manida pretensión de que los datos cosmológicos verifican las predicciones de la teoría inflacionaria resulta, cuando menos, engañosa. Lo máximo que podemos afirmar es que los datos han corroborado las predicciones de una teoría inflacionaria ingenua, aquella anterior a 1983. Pero esa teoría no coincide con la cosmología inflacionaria de hoy. Una interpretación ingenua concluye que la inflación lleva a un resultado predecible, gobernado por las leyes de la física clásica. Pero, en realidad, es la mecánica cuántica quien rige la inflación, con la consecuencia de que cualquier cosa que pueda suceder ocurrirá. Y si la teoría inflacionaria no realiza predicciones, ¿para qué sirve?

El problema de fondo radica en que carecemos de un mecanismo que penalice la procrastinación; antes bien, todo juega en favor de las regiones que posponen el final de la inflación. Estas continúan creciendo a un ritmo acelerado, por lo que resulta inevitable que acaben tomando el control. En una situación ideal, dichas regiones deberían expandirse con mayor lentitud o, mejor aún, encoger. Así, la inmensa mayoría del universo se compondría de zonas en las que la fase inflacionaria termina a tiempo y nuestro universo no constituiría una excepción incómoda.

Una alternativa, propuesta junto a otros colaboradores y conocida como teoría cíclica, exhibe justo esa propiedad. Según esta, la gran explosión no habría supuesto el principio del espacio y el tiempo [*véase* «El universo antes de la gran explosión», por Gabriele Veneziano; Investigación y Ciencia, julio de 2004], sino un «rebote» desde una fase previa de contracción hacia otra de expansión, el cual se habría visto acompañado por la creación de materia y energía. La teoría es cíclica porque, un billón de años después, el universo comienza a contraerse de nuevo y el proceso se repite. La clave reside en que el «suavizado» del universo ocurre antes del rebote, durante la época de contracción. Así, las regiones procrastinadoras continúan encogiendo, pero las normales rebotan y comienzan a expandirse. En comparación, el volumen que ocupan las zonas perezosas resulta pequeño y sus efectos pueden desestimarse.

Un suavizado durante el período de contracción tendría una consecuencia observable. Durante cualquier fase de suavizado, tanto en la teoría inflacionaria como en la cíclica, las fluctuaciones cuánticas generan ondas gravitacionales (pequeñas perturbaciones que se propagan a través del espaciotiempo) que dejan una huella característica en la radiación de fondo de microondas. La amplitud de esas ondas resulta proporcional a la densidad de energía. Sin embargo, la inflación tiene lugar en un momento en que la densidad del universo es muy elevada, mientras que el proceso equivalente en el modelo cíclico ocurre cuando el universo se encuentra casi vacío, por lo que las señales predichas por ambos modelos difieren por completo. Por supuesto, la teoría cíclica se halla en sus comienzos y puede que adolezca de sus propios problemas, pero pone de manifiesto que existen alternativas concebibles que no sufren de una inflación descontrolada. Además, nuestro trabajo preliminar apunta a que el modelo cíclico evitaría también los otros problemas expuestos arriba.

Bien es cierto que aquí hemos presentado los argumentos a favor y en contra de la inflación sin conceder derecho a réplica y sin entrar en matices. En un encuentro celebrado el pasado mes de enero en el Centro de Ciencia Teórica de Princeton, numerosos teóricos de primera línea defendieron la idea de que los problemas del modelo inflacionario apenas representan algo más que una molestia y que no deberían socavar nuestra confianza en sus ideas básicas. Otros, yo incluido, sostuvimos que reflejan inconsistencias graves en los fundamentos de la inflación, y que esta debería reformularse o ser reemplazada por otra teoría.

Al final, el veredicto lo emitirán los datos; en particular, las próximas observaciones de la radiación de fondo de microondas. Los experimentos pertinentes (en cimas montañosas, globos sonda y satélites) ya se encuentran en marcha, y los primeros resultados deberían estar listos en dos o tres años. Una detección de la señal de ondas gravitacionales respaldaría el modelo inflacionario; su ausencia le asestaría un serio revés. Para que la inflación tuviera sentido a pesar de un resultado negativo, habría que suponer un potencial muy particular para el inflatón, uno con una forma tal que suprimiese las ondas gravitacionales. Ello resultaría muy artificioso. De ser así, muchos dirigirán su atención hacia otras alternativas que, como la teoría del universo cíclico, predigan de manera natural una señal inobservable. En todo caso, los datos marcarán un momento crucial en nuestra comprensión acerca de cómo el universo ha llegado a ser lo que es y qué le ocurrirá en el futuro.

PARA SABER MÁS

The inflationary universe. Alan Guth. Basic Books, 1998.

Quantum cosmology, inflation, and the anthropic principle. Andrei Linde en *Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology and Complexity*, coordinado por John D. Barrow, Paul C. W. Davies y Charles L. Harper, Jr. Cambridge University Press, 2004.

Endless universe: Beyond the big bang. Paul J. Steinhardt y Neil Turok. Doubleday, 2007.

The measure problem in cosmology. G. W. Gibbons y Neil Turok en *Physical Review D*, vol. 77, n.º 6, artículo 063516, marzo de 2008. Disponible en **http://arxiv.org/abs/hep-th/0609095**

From eternity to here: The quest for the ultimate theory of time. Sean Carroll. Dutton Adult, 2010.

Michael S. Gazzaniga, miembro del panel de asesores de *Scientific American*, es director del Centro SAGE para el Estudio de la Mente de la Universidad de California en Santa Barbara. Ha dirigido el proyecto Derecho y Neurociencia de la Fundación John D. y Catherine T. MacArthur.



NEUROIMAGEN

LA NEUROCIENCIA EN EL SISTEMA JUDICIAL

Los escáneres cerebrales podrían transformar nuestras nociones legales de responsabilidad o credibilidad

Michael S. Gazzaniga

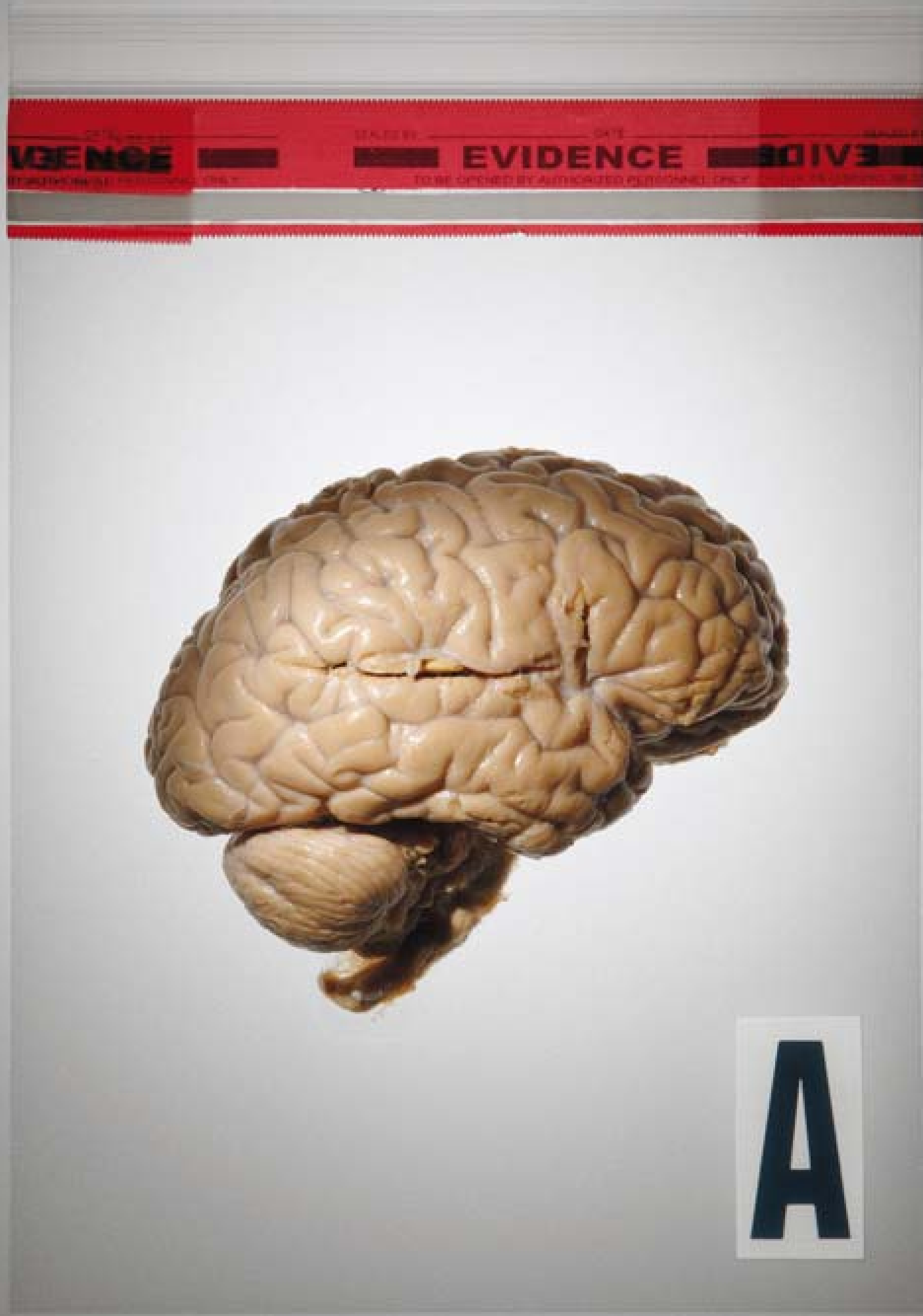
EN SÍNTESIS

Hoy en día los escáneres cerebrales rara vez se admiten como prueba en un juicio. Sin embargo, conforme la neurociencia avance, tal vez se reconsidere su importancia a la hora de evaluar el estado mental de un acusado o la credibilidad de un testigo.

En último término, la influencia de la neurociencia en el sistema legal provendrá de una comprensión más profunda de las causas neurológicas de las conductas ilegales o antisociales. Hallazgos futuros podrían servir como base a nuevas líneas de defensa.

Dichos avances también podrían dar la vuelta a nuestras nociones sobre la responsabilidad y el castigo justo. La sociedad y los tribunales habrán de proceder con cautela antes de incorporar al sistema legal los descubrimientos en el campo de la neurociencia.

CORTESÍA DEL DEPARTAMENTO DE PATOLOGÍA DEL HOSPITAL DE LA UNIVERSIDAD DE COLUMBIA, FOTOGRAFÍA DE ZACHARY ZAVISLAK


EVIDENCE
A

Por una extraña coincidencia, al poco de haber comenzado a dirigir un proyecto de la Fundación MacArthur cuyo objetivo era analizar el papel de la neurociencia en el sistema judicial, fui llamado por primera vez en mi vida para formar parte de un jurado popular. De entre las ochenta personas convocadas, el juez debía elegir a aquellas que habrían de evaluar el caso de una joven acusada de conducir bajo los efectos del alcohol. Muchos quedaron exentos por una razón u otra; la mayoría, por haber conducido alguna vez en estado etílico.

Cuando el juez me reclamó y me preguntó a qué me dedicaba, le respondí que era neurocientífico. «De hecho, he trabajado en cuestiones relevantes para el sistema judicial: la formación de falsos recuerdos, la naturaleza de las adicciones o el modo en que el cerebro regula el comportamiento.» El magistrado consideró mis palabras. «¿Cree que durante el juicio podrá dejar de lado cuanto sabe sobre el tema?». Respondí que podía intentarlo. Tras ello, me declaró no apto.

Me sentí decepcionado, pero no hubiera debido estarlo. En aras de la ecuanimidad, un jurado no debería guiarse sino por lo que oiga durante la vista, por lo que cabe esperar que el juez descarte a aquellos candidatos que, por sus conocimientos o experiencia previos, pudiesen influir en exceso sobre los restantes miembros del jurado. Por otro lado, no deja de ser cierto que, al recusarme, el juez encarnaba la desconfianza y el rechazo que el sistema legal contemporáneo muestra hacia la neurociencia.

Hoy día, merced a las técnicas de formación de imágenes, resulta posible atisbar en el interior del cerebro vivo y elucidar la actividad neural que subyace bajo determinadas formas de pensamiento y conducta. Algunos letrados ya han intentado esgrimir escáneres cerebrales como pruebas ante un juicio. Los tribunales, por su parte, intentan dilucidar cuándo estos deberían ser admisibles. Con el tiempo, la posibilidad de relacionar los patrones de actividad mental con ciertos estados mentales podría dar la vuelta a las directrices para decidir si un acusado controlaba sus actos o para determinar su pena. Nadie sabe aún en qué derivarán estos cambios; pero el sistema judicial, la opinión pública y los neurocientíficos necesitan entender lo que está en juego para seguir garantizando una sociedad justa, por más que este tipo de cuestiones sacudan algunas de las ideas tradicionales sobre la naturaleza humana.

El concurso de la neurociencia para evaluar la honestidad general de un individuo podría abrir las puertas a su uso para sondear su sinceridad con respecto a una cuestión concreta

PRUEBAS INACEPTABLES... POR AHORA

A medida que aumenta la disponibilidad de imágenes que revelan el estado cerebral de una persona, cada vez más letrados solicitan que estas se admitan como pruebas a fin de demostrar, por ejemplo, la veracidad de un testigo o la inocencia de un acusado en razón de su demencia. El juez dará su visto bueno si cuenta con la certeza de que el jurado no verá en los escáneres más que una prueba adicional, o si estima que las imágenes ayudarán a analizar mejor alguna cuestión relevante para el caso. Sin embrago, rechazará la solicitud si considera que un escáner resultará demasiado persuasivo, o que se le atribuirá excesiva importancia solo por su impresionante aspecto científico. Es decir, los jueces han de determinar si la admisión de escáneres cuenta con valor probatorio o si, por el contrario, puede favorecer ideas preconcebidas y confundir al jurado. Hasta ahora, de acuerdo con la opinión tradicional de la mayoría de los neurocientíficos y juristas, los jueces han venido fallando casi siempre que los escáneres cerebrales podrían condicionar al jurado y que su valor probatorio resultaba escaso o nulo.

Asimismo, los escáneres cerebrales han sido excluidos de manera rutinaria ya que se alega que, desde un punto de vista científico, las únicas afecciones que pueden mostrar son lesiones físicas en el cerebro. Durante un proceso criminal, sin embargo, un abogado puede querer emplearlos para demostrar trastornos cognitivos o emocionales por parte de su cliente (errores de juicio, cuestiones morales o de control de sus impulsos). Pero, al menos por ahora, casi todos los jueces e investigadores admiten que tales usos aún no cuentan con fundamento científico.

Las imágenes por resonancia magnética funcional (IRMf) aportan gran cantidad de información científica de calidad que, sin embargo, apenas cuenta con valor legal. Esta técnica se emplea con profusión para investigar la actividad de las regiones cerebrales implicadas en procesos que van desde la lectura o el habla hasta soñar despierto. Sin embargo, no mide directamente los impulsos eléctricos emitidos por las neuronas, sino el flujo sanguíneo local, el cual se cree que se halla relacionado con la actividad neuronal. Además, la manera de determinar qué señal se corresponde con cierta actividad cerebral consiste en promediar los escáneres de un grupo de probandos, pero los patrones pueden diferir bastante entre un individuo y otro. Durante un juicio, el escáner del acusado puede desviarse en gran medida de los valores medios y, aun así, hallarse dentro de los márgenes estadísticos que definen dicho promedio.

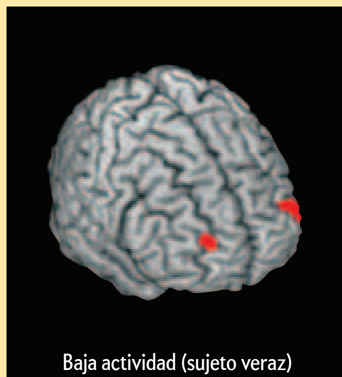
Por otra parte, no siempre se conoce la prevalencia de ciertas variaciones en la anatomía y la actividad cerebral dentro de una población. Mostrar el escáner cerebral de un acusado sin cotejarlo con el grupo de referencia adecuado podría desorientar gravemente al jurado. Ya resulta problemático para un juez valorar si debe admitir como prueba escáneres indicativos de problemas neurológicos o psiquiátricos susceptibles de atenuar la culpabilidad de un individuo. En el futuro, las dificultades podrían aumentar si hubiese que decidir acerca de imágenes relativas a estados mentales complejos, como la credibilidad o la veracidad de un testigo.

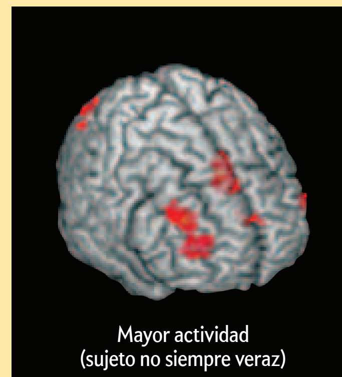
Desde que, a principios del siglo xx, el psicólogo e inventor William Moulton Marston proclamase que un polígrafo que registrase la tensión arterial, el ritmo cardíaco, la conductividad de la piel y otros parámetros fisiológicos permitiría averiguar cuándo miente una persona, los detectores de mentiras han sido objeto de vivos debates en el ámbito legal. En EE.UU., buena parte de los tribunales han desestimado los resultados de los polígrafos. No obstante, otras técnicas se encuentran en desarrollo y, antes o después, los tribunales deberán pronunciarse al respecto. Entre ellas se cuentan las imágenes cerebrales que aspiran a determinar qué estados mentales reflejan la veracidad de un sujeto.

EL SIGNIFICADO DE UN ESCÁNER

La lucha neuronal contra la tentación

Un estudio reveló uno de los escollos a la hora de emplear los escáneres cerebrales como detectores de mentiras. Al evaluar la honestidad de una persona, las imágenes por resonancia magnética funcional mostraron que, en comparación con sujetos que siempre decían la verdad (*izquierda*), aquellos que en ocasiones mentían (*derecha*) exhibían una mayor actividad neuronal (*rojo*) en algunas de las regiones que intervienen en el control cognitivo. Pero esta actividad se daba con independencia de que los probandos mintiesen o no en un caso concreto, por lo que el resultado no permitía averiguar si alguien estaba diciendo la verdad. Tan solo parecía indicar los procesos de control cognitivo que se dan en un individuo que se halla ante la oportunidad de mentir.





DE «PATTERNS OF NEURAL ACTIVITY ASSOCIATED WITH HONEST AND DISHONEST MORAL DECISIONS», POR JOSHUA D. GREENE Y JOSEPH M. PAXTON, EN PNAS, VOL. 106, N.º 30; 28 DE JULIO DE 2009

MENTIRAS Y CREDIBILIDAD

Investigaciones recientes de Anthony D. Wagner y colaboradores de la Universidad Stanford han demostrado que, bajo condiciones controladas, las técnicas de IRMf, combinadas con ciertos algoritmos analíticos complejos denominados clasificadores de pautas, consiguen determinar con precisión si una persona está recordando algo. Sin embargo, la técnica no permite averiguar si el contenido de tales recuerdos es real o imaginario. Por tanto, resultaría posible emplear la IRMf para saber si un individuo cree estar evocando algo, pero no para evaluar la exactitud de esos recuerdos. Wagner opina que los métodos de IRMf quizá lleguen a ser eficaces en la detección de mentiras, pero que, por ahora, se necesitan estudios adicionales.

Otros experimentos con IRMf ayudan a mostrar la naturaleza de la honradez. ¿Se debe esta a la ausencia de tentación, o a la fuerza de voluntad para resistirla? En 2009, Joshua D. Greene y Joseph M. Paxton, de la Universidad de Harvard, ofrecieron dinero a sus probandos si exageraban el número de los aciertos obtenidos al lanzar una moneda. Los investigadores realizaron escáneres de los individuos en el momento en que debían decidir si mentían o no. Observaron una correlación entre una conducta deshonesta y una mayor actividad en algunas regiones cerebrales implicadas en el control de impulsos y la toma de decisiones. Sin embargo, observaron los mismos patrones en algunos de los individuos que habían dicho la verdad, por lo que cabía la posibilidad de que las imágenes reflejasen los esfuerzos de los probandos para resistirse a la tentación, y no su veracidad. Por tanto, los expertos instan a los magistrados a proceder con cautela antes de admitir este tipo de datos como prueba en un juicio.

Pero esa opinión no es universal. Frederick Schauer, profesor de derecho en la Universidad de Virginia y experto en informes periciales, señala que, en la actualidad, los tribunales aceptan gran cantidad de indicios que resultan mucho menos fiables que las técnicas de detección de mentiras. Hoy en día, la manera de valorar la veracidad de un sujeto adolece de imprecisiones y se basa en ideas falsas sobre el comportamiento deshonesto. El porte o la manera de actuar de una persona no siempre proporcionan indicios fiables sobre su honradez. Para determinar qué pruebas son admisibles en un juicio, la justicia emplea criterios que se muestran más laxos que los estándares científicos. Schauer sostiene que debería permitirse que un jurado tome en consideración los resultados de un detector de mentiras con una tasa de acierto del 60 por ciento, ya que ello podría suscitar dudas razonables sobre la culpabilidad o inocencia del acusado.

En EE.UU., uno de los primeros casos en los que fue necesario considerar la licitud de las técnicas de escáner cerebral para la detección de mentiras tuvo lugar en 2010, cuando un magistrado de Tennessee desestimó los resultados de un detector de mentiras comercial que empleaba técnicas de IRMf. Su decisión se basó en parte en la Ley Federal 403, la cual establece que un informe debe ser aceptado si cuenta con carácter probatorio, pero debe rechazarse si puede fomentar prejuicios. El juez argumentó que este era el caso, ya que el experto encargado de llevar a cabo el test no podía determinar la veracidad de cada una de las respuestas del acusado; según explicó, solo podía establecer si estaba respondiendo con sinceridad al conjunto de preguntas que componían el interrogatorio.

Resulta forzoso preguntarse si, en el futuro, deberían admitirse como pruebas informes que se limiten a certificar la honradez general de un acusado. El concurso de la neurociencia para evaluar la honestidad general de un individuo podría abrir las puertas a su uso para sondear su sinceridad con respecto a una cuestión concreta. La Ley Federal 608(b) estipula que, una vez que se cuestione la honradez de un testigo, los letrados pueden aportar pruebas basadas en las opiniones de terceros sobre la «honestidad o falsedad» de la persona. En nuestros días, este tipo de informes consisten en las declaraciones de otras personas sobre la honradez del testigo. Pero ¿qué ocurrirá en el futuro? ¿Deseará un jurado saber qué puntuación obtiene un acusado en un test de sinceridad? ¿Perderá legitimidad dicha evaluación si procede de una máquina extravagante? Presumo que, con el tiempo, aumentará el uso de este tipo de técnicas y que, conforme la sociedad se habitúe a ellas, disminuirá el rechazo inicial que susciten.

ESCÁNERES Y PSICOPATÍAS

Jueces y letrados están empezando a verse en la necesidad de decidir sobre el papel de los escáneres cerebrales en un proceso judicial. No obstante, a largo plazo, el máximo impacto de la neurociencia sobre el sistema legal llegará, sin duda, de una comprensión profunda sobre la manera en que el cerebro determina la conducta. Ya desde la infancia, las personas manifestamos un sentido innato de justicia y reciprocidad, así

como el deseo de consolar al maltratado y castigar al transgresor. Somos jueces y jurados desde la cuna. A partir de tales instintos hemos racionalizado la forma en que nuestra cultura ha de examinar y penalizar las conductas antisociales. Algún día, la neurociencia podría imponer una revisión de las normas procesales a la hora de determinar la culpabilidad de un individuo y decidir su pena. Quizá también eche por tierra lo que la sociedad entiende por libre albedrío, así como los procedimientos para responsabilizar a una persona de sus actos antisociales.

Consideremos la situación psiquiátrica y legal de los psicópatas, quienes, sin llegar al uno por ciento de la población, integran el 25 por ciento de los reclusos. Aunque en el lenguaje coloquial el término «psicópata» se aplica a gran cantidad de delincuentes, violentos o no, en un sentido técnico se reserva a aquellos con un cuadro clínico bien definido de trastornos psiquiátricos, diagnosticados mediante la Lista de Chequeo de Psicopatía Revisada de Hare (PCL-R, por sus siglas en inglés).

Con frecuencia, los psicópatas exhiben cierto grado de encanto superficial y resultan egocéntricos, grandilocuentes, embusteros y faltos de sentimientos de culpa o empatía, aspectos que evalúa la PCL-R. No obstante, las pruebas psicométricas de este tipo representan solo indicadores estadísticos de disfunciones neurológicas. Las técnicas de neuroimagen deberían, al menos en teoría, diagnosticar con mucha mayor eficacia los rasgos psicópatas.

Hasta la fecha, numerosos estudios han asociado las psicopatías con anomalías en la actividad cerebral. Los psicópatas parecen mostrar reacciones neurológicas anormales ante estímulos que requieran gran atención y ante palabras de significado emotivo, ya sean concretas o abstractas. Sin embargo, tales respuestas también se han observado en personas que han sufrido lesiones en el lóbulo temporal medial, por lo que no constituyen una prueba indiscutible de psicopatía. Otros resultados preliminares apuntan a que los psicópatas acusarían lesiones en el sistema límbico, el cual contribuye a generar las emociones.

Se buscan también anomalías en las conexiones cerebrales. Marcus E. Raichle, Benjamin Shannon y colaboradores de la Universidad Washington en St. Louis, junto a Kent Kiehl, de la Universidad de Nuevo México, han analizado escáneres cerebrales de presos adultos y delincuentes menores de edad, todos ellos diagnosticados como psicópatas según la PCL-R. Se observó que los adultos exhibían una variedad de conexiones inusitadas entre ciertas regiones cerebrales, aunque ninguna de las alteraciones exhibía una predominancia clara. Los menores, en cambio, mostraban de manera más sistemática una serie de anomalías sorprendentes, las cuales aumentaban con su grado de impulsividad. Una interpretación posible sostiene que los jóvenes impulsivos carecen de algunas de las restricciones neurales que, en condiciones normales, intervienen al elegir la manera de actuar. Es posible que, en delincuentes juveniles no sometidos a tratamiento, una anomalía cerebral que promueva la conducta impulsiva se extienda y acabe por provocar los patrones inusuales observados en adultos. Ello podría explicar por qué los tratamientos psiquiátricos se muestran más eficaces en los jóvenes que en los mayores, quienes con frecuencia no responden a ellos.

Si bien se trata de un asunto controvertido, hoy por hoy la psicopatía no constituye un eximente. Antes bien, se considera que un delincuente psicópata resulta más peligroso que otro que no padezca el trastorno, por lo que recibirá una pena mayor. Una técnica de neuroimagen que permitiese identificar con fiabilidad a los psicópatas ayudaría a fijar la sentencia, puesto que podría determinar si el acusado requiere reclusión hospitalaria y tratamiento. Quizá cueste convencer a la opinión pública de que un delincuente psicópata no debe acabar en la cárcel, pero, si se contasen con pruebas suficientes, tal práctica podría acabar constituyendo doctrina legal. Es de esperar que, para entonces, la neurociencia haya dado con mejores procedimientos para sanar o rehabilitar a estas personas.

LA NEUROCIENCIA Y LA DEFENSA

Las normas procesales vigentes admiten solo un repertorio limitado de posibles líneas de defensa. ¿Aportará la neurociencia otras nuevas? Por ejemplo, los tribunales han rechazado de manera sistemática las defensas que alegan el «síndrome de la mujer maltratada» en casos en los que una mujer había agre-

PROCEDIMIENTOS

Antes de admitir un escáner como prueba

Como todo informe científico, los escáneres cerebrales han de superar al menos dos fases de revisión antes de ser empleados en un juicio. Los abogados solo pueden recurrir contra la decisión de admitir un escáner si consideran que el juez se ha extralimitado en sus competencias.

Por la defensa
Un abogado puede solicitar a un experto que efectúe un examen neurológico del acusado o de un testigo. Si el resultado no es favorable, no lo da a conocer.



Por el tribunal
Durante la vista preliminar, el juez determina si los escáneres presentados cumplen los requisitos para ser considerados probatorios y si resultan informativos o si, por el contrario, pueden fortalecer ideas preconcebidas en el jurado.



En la vista
En su caso —lo que no ocurre a menudo—, los letrados se hallan autorizados para mostrar al jurado los escáneres cerebrales aprobados por el juez.

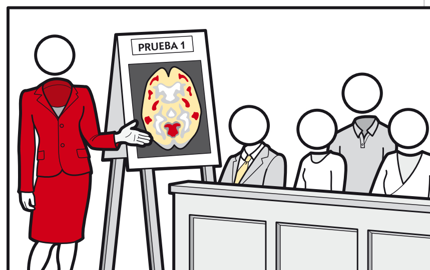


ILUSTRACIÓN DE BROWN BIRD DESIGN

dido con medios letales a un cónyuge que la golpeaba con asiduidad. No obstante, en algunos estados de EE.UU. sí se admiten en un juicio las declaraciones de expertos que afirman que el síndrome constituye un caso de trastorno de estrés postraumático, lo que puede tomarse en consideración a la hora de evaluar la credibilidad de una mujer que afirma haberse visto obligada a actuar en defensa propia. Tales precedentes abren la puerta a un uso legal más amplio de la neurociencia.

La determinación del estado mental de un acusado resulta crucial a la hora establecer su grado de responsabilidad. Read Montague, de la Escuela de Medicina Baylor, y Gideon Yaffe, profesor de derecho de la Universidad de California del Sur, estudian si algunos adictos padecen una variante de la «ceguera al riesgo». Una persona normal aprende que atracar un comercio pone en peligro su posibilidad de disfrutar de la familia y los amigos, sus oportunidades de realizar una carrera productiva, etcétera. Montague y Yaffe creen que algunos adictos son incapaces de apreciar las ventajas de un proceder recto. En principio, sus hallazgos podrían emplearse como argumento para modificar la definición de «persona razonable» en derecho penal. En ese caso, un adicto podría acabar siendo juzgado sobre la base de lo que se esperaría de un «adicto razonable» ante la misma situación, lo que quizá derivase en una absolución o en una reducción de pena.

Los ejemplos anteriores cuestionan la manera en que nuestra cultura y los tribunales han de gestionar las conductas antisociales. Como ha planteado el neurocientífico William T. Newsome, de la Universidad Stanford, ¿acaso se nos asignará una «clasificación de responsabilidad» personalizada que pudiera ser esgrimida en caso de infracción criminal? Si, como pronostican algunos expertos, a no tardar todos llevaremos nuestro historial médico grabado en una memoria digital, ¿incluirá este un perfil cerebral y conductual que determine cuán razonables o responsables somos? ¿Supondría ello un avance social y judicial, o resultaría contraproducente? ¿No sufrirían las nociones de libre albedrío y de responsabilidad personal un enorme desgaste si todo comportamiento antisocial pudiera explicarse en términos neurológicos?

A mi entender, los avances científicos sobre la forma en que el cerebro da paso a la mente deben mantenerse separados de las discusiones sobre la responsabilidad individual. Como he explicado en otras ocasiones, el concepto de responsabilidad personal surge a partir de las interacciones sociales. Forma parte de las reglas de intercambio social, no del cerebro.

CAUTELAS

A pesar de la gran cantidad de conocimientos que la neurociencia nos ha brindado, estudios recientes sobre el cerebro de individuos jóvenes muestran la necesidad de proceder con cautela a la hora de incorporarlos a la jurisprudencia. En 2005, el Tribunal Supremo estadounidense falló que la ejecución de un reo que había cometido un asesinato con menos de 18 años de edad constituía un castigo cruel e inusitado. El tribunal basó su veredicto en tres diferencias entre los delincuentes adultos y los menores de edad: una carencia notable de madurez y responsabilidad; una mayor susceptibilidad ante las malas influencias y una menor independencia para evitarlas, y un carácter menos formado que en el caso de un adulto. Aunque el tribunal era consciente de que con ello trazaba una línea arbitraria, falló que nadie que en el momento de cometer el delito fuese menor de edad podría ser condenado a la pena capital. En mayo de 2010, el tribunal amplió esa limitación al decidir que, salvo en casos de homicidio, condenar a un menor a cadena perpetua sin posibilidad de libertad condicional vulneraba la prohibición constitucional de infligir castigos crueles y desacostumbrados. El tribunal, citando fuentes de la Asociación Médica Americana, determinó que la psicología y la neurociencia mostraban diferencias fundamentales entre la mente de un adulto y la de un menor.

Pero ¿hasta qué grado se sostiene la afirmación anterior? Un estudio realizado por Gregory S. Burns, Sara Moore y C. Monica Capra, de la Universidad Emory, exploró la propensión de los jóvenes a implicarse en conductas de riesgo; el objetivo consistía en determinar si semejante proceder derivaba de una inmadurez en los sistemas cognitivos que regulan las respuestas emocionales. Los investigadores emplearon la técnica de formación de imágenes por tensor de difusión (ITD) para examinar los tractos de sustancia blanca que conectaban varias regiones de control en la corteza cerebral de 91 menores de edad. Para su sorpresa, hallaron que, en aquellos jóvenes que incurrían en conductas de riesgo, las zonas estudiadas exhibían un aspecto «más adulto» que en el resto.

Vemos pues que, en este caso, las imágenes cerebrales apuntaban en sentido contrario a los planteamientos tradicionales, tanto legales como científicos, relativos a las capacidades de los menores de edad. Si las conclusiones anteriores se viesen confirmadas por otros estudios, la ley, según su propia lógica, debería juzgar a los delincuentes menores de edad de acuerdo con los mismos criterios que a los adultos. O bien podría exigirse de los acusados que se sometan a exámenes de ITD o de otro tipo para determinar si su sustancia blanca se asemeja a la de un adulto, con miras a que los resultados sirvan como guía a la hora de fallar la sentencia. El alcance de las consecuencias muestra cuán peligroso puede resultar adoptar modificaciones legales basadas en datos científicos antes de que exista una cantidad suficiente de estudios que avalen sus conclusiones.

Por impresionantes que se muestren los avances en neurociencia, hemos de considerar con cautela la manera en que estos deberán incorporarse a nuestra cultura. Sus implicaciones legales no constituyen sino uno de sus muchos aspectos. ¿Querremos algún día disponer del escáner de nuestra pareja, de nuestros socios o de los políticos, aunque sus resultados no se acepten en un tribunal? Conforme evolucione la comprensión científica de la naturaleza humana, nuestra actitud moral acerca de cómo deseamos gestionar una sociedad justa se adaptará a los descubrimientos. Nadie desea apresurarse a adoptar referentes nuevos sin antes dedicar el máximo cuidado y atención a cada hallazgo. Sin embargo, tampoco nadie puede ignorar los cambios que asoman en el horizonte.

PARA SABER MÁS

Patterns of neural activity associated with honest and dishonest moral decisions. Joshua D. Greene y Joseph M. Paxton en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 106, n.º 30, págs. 12.506-12.511, 2009.

Adolescent engagement in dangerous behaviors is associated with increased white matter maturity of frontal cortex. Gregory S. Berns, Sara Moore y C. Monica Capra en *PLoS ONE*, vol. 4, n.º 8, e6773, 2009.

Altered functional connectivity in adult and juvenile psychopathy: A rest-state fMRI analysis. Benjamin Shannon et al. Resumen del XVI encuentro anual de la Organization for Human Brain Mapping. Barcelona, 2010.

Detecting individual memories through the neural decoding of memory states and past experience. Jesse Rissman, Henry T. Greely y Anthony D. Wagner en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 107, n.º 21, págs. 9849-9854, 2010.

Who's in charge? Free will and the science of the brain. Michael S. Gazzaniga. Ecco Harper-Collins, 2011.

Proyecto Derecho y Neurociencia: **www.lawandneuroscienceproject.org**



Eitan Haddok es fotógrafo y periodista. Posee un máster en geofísica y ciencias planetarias.

MEDIOAMBIENTE

¿Sobrevivirá el mar Muerto?

El riego y la minería están secando el lago, pero la colaboración entre Israel, Jordania y la Autoridad Palestina podrían salvar este mar sagrado

Texto y fotografías de Eitan Haddok

El mar Muerto es un lugar misterioso: la superficie topográficamente más baja del planeta, considerada la tierra de Sodoma y Gomorra, una supuesta fuente de aguas terapéuticas y, a pesar del nombre, un valioso tesoro con una vida microbiana inusual. En cambio, su futuro resulta del todo previsible. Tras siglos de estabilidad mantenida por el delicado equilibrio entre el aporte de agua dulce del río Jordán y la evaporación bajo el incesante sol de Oriente Medio, en la actualidad el lago está desapareciendo.

Jordanos al este, israelíes al oeste y sirios y libaneses al norte están extrayendo tanta cantidad de agua dulce de la cuenca fluvial que apenas llega agua al mar. Paralelamente, Israel y Jordania bombean agua del lago para extraer minerales de interés, con lo que aceleran su deterioro. En las orillas de este lago en retroceso se han originado miles de dolinas, con el consiguiente hundimiento del terreno. Este fenómeno ha afectado al turismo y al desarrollo costero, ya que no puede predecirse el lugar donde colapsará la siguiente dolina, que podría engullir edificios, carreteras o personas.

Preocupados por la pérdida de un valioso recurso natural y cultural, dirigentes de Israel, Jordania y la Autoridad Palestina han propuesto una enorme canalización para traer agua desde el mar Rojo, situado al sur del mar Muerto. Los científicos investigan los posibles efectos de la mezcla de aguas en las propiedades químicas y biológicas del lago y debaten si el nuevo aporte de agua teñirá el mar de rojo. Por otro lado, los políticos analizan la disposición de todas las naciones a financiar esta medida de salvación que costará 10.000 millones de dólares, mientras los expertos en medioambiente se oponen al faraónico proyecto. Entre tanto, los gobiernos al cargo de otros cuerpos de agua salada, como el mar de Aral, el mar Caspio o el Gran Lago Salado en Utah, esperan aprender lecciones que les puedan servir en un futuro. Nuestro artículo ofrece una visita por este mar agonizante y los esfuerzos que se dedican a resucitarlo.

EN SÍNTESIS

La superficie del mar Muerto se sitúa a −424 metros y su nivel desciende un metro al año a medida que las aguas de aporte se utilizan para labores de riego y se hace evaporar el agua del lago para extraer minerales.

Miles de dolinas se forman como consecuencia de la retirada del agua salada subterránea y su sustitución por agua menos salada, lo que provoca el colapso del material suprayacente.

Un sistema de conductos de 180 kilómetros de longitud podría suministrar el agua salada necesaria desde el mar Rojo. Se está estudiando el modo en que esta mezcla de aguas alteraría la vida marina.



El mar Muerto se sitúa a 424 metros por debajo del nivel del mar, y la superficie de sus aguas desciende a razón de un metro por año. En algunas áreas, el límite del lago ha retrocedido hasta un kilómetro. A lo largo de su perímetro han colapsado más de 3000 dolinas. En los últimos años se ha abierto una dolina cada dos días, aproximadamente. Algunas se rellenan de salmuera; otras no.



1





HUNDIMIENTOS DE TIERRA

Las dolinas (*1*) pueden alcanzar 25 metros de diámetro y 15 metros de profundidad. Pueden abrirse de manera brusca, engullendo excursionistas, edificios o carreteras (*3*).

La mayoría de los expertos apunta a los procesos de disolución como causa de este fenómeno: conforme el agua del lago se retira, el agua salada subterránea también lo hace; su lugar lo ocupa agua subterránea menos salada, que al entrar en contacto con las capas salinas subsuperficiales del material suprayacente, las disuelve y provoca su hundimiento.

Algunos de estos grandes huecos se rellenan de salmuera; otros no. En ocasiones, las alineaciones de dolinas originan fallas geológicas superficiales (*2*) que facilitan la intrusión de agua dulce a medida que el agua salada se retira. Entender el funcionamiento de estos mecanismos ayudaría a explicar la formación de misteriosas dolinas en Florida, Guatemala, Alemania y España.

La razón principal por la que el mar está menguando es que el aporte de agua del río Jordán, procedente del norte, ha disminuido desde 1300 hasta 30 millones de kilómetros cúbicos al año. En consecuencia, la evaporación del mar supera a la entrada de agua dulce; el lóbulo sur del lago ha desaparecido.

El aporte del río se ha reducido debido a los bombeos realizados en Israel, Jordania, Siria y Líbano, que extraen agua para el consumo agrícola y humano (*4*); algunos conductos quedan fuera de uso a medida que se drena el río (*primer plano en la fotografía*).




1


3



CORTESÍA DE NASA Y USGS (*arriba a la izquierda*)



2



4

POSIBLE RECUPERACIÓN

El mar está menguando, además, debido a que las empresas químicas Dead Sea Works, en Israel, y Arab Potash Company, en Jordania, canalizan el agua de norte a sur. Allí desemboca en enormes lagos artificiales en cascada, donde anteriormente existía el lóbulo sur del mar (*1, azul; 2, visto desde cerca*). Como resultado de la evaporación, se concentran minerales como bromo, magnesio y potasa, así como sales (*3*), que son explotados por las empresas. El aire de esta enorme área presenta uno de los valores de mercurio oxidado más elevados del planeta, consecuencia de la alta concentración de bromo.

De continuar la situación actual, en el año 2200 el nivel del mar Muerto podría descender hasta los –550 metros. El retroceso cesaría si se construyeran 180 kilómetros de canales y conductos, de acuerdo con la propuesta de trasvase desde el mar Rojo. Las plantas desalinizadoras a lo largo de la canalización producirían 900 millones de metros cúbicos de agua dulce al año. La mayoría se destinaría al río Jordán. Los 1100 millones de metros cúbicos de salmuera residual se inyectarían en el mar Muerto. El desnivel a lo largo del trayecto de la canalización podría ser aprovechado por centrales hidroeléctricas. El Banco Mundial tiene previsto terminar un estudio de viabilidad de 17 millones de dólares en julio del presente año. Si llega a construirse, la canalización conseguiría estabilizar el nivel del mar entre los –410 y los –420 metros en el año 2050.

Sin embargo, puede que la salmuera procedente de la desalinización no represente un sustituto adecuado del agua del río Jordán. La salmuera y el agua salada del mar podrían estratificarse y disponerse en capas separadas. Es posible que proliferen algas y bacterias que cambien el color del mar de turquesa a rojo. Los experimentos en tanques realizados por microbiólogos indican que, en efecto, podrían aparecer floraciones de algas (*4*), aunque los ensayos todavía no son concluyentes ni se han duplicado de forma independiente.

La salvación del mar Muerto conllevaría beneficios de diversa índole. Los biólogos han descubierto hace poco una nueva forma de metabolismo en determinados microorganismos que habitan en sus aguas. Igualmente, se ha logrado trasplantar genes de un hongo endémico en una cepa de levadura que, como resultado, ha mostrado una alta resistencia a la salinidad, así como al calor y a la oxidación. El gen permitiría el desarrollo de plantas en suelos salinos no aptos para el cultivo, lo que aseguraría el abastecimiento de alimentos a millones de habitantes de países con suelos salinos.

PARA SABER MÁS

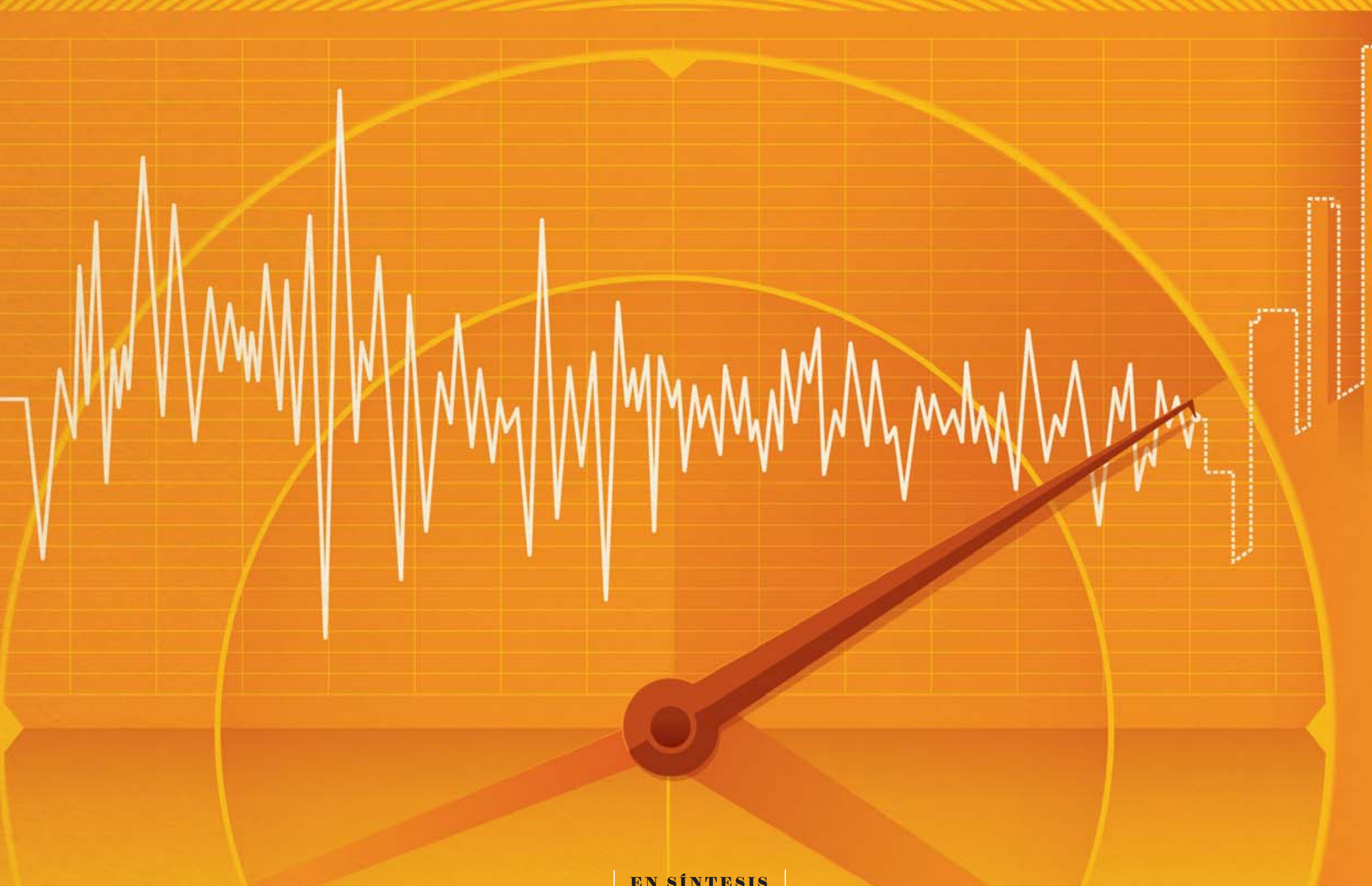
Más información sobre la canalización entre el mar Rojo y el mar Muerto en: **www.foeme.org** y **www.worldbank.org**

SISMOLOGÍA

SEGUNDOS ANTES DEL GRAN TEMBLOR

Un sistema propuesto para California, similar a los existentes en México, Japón y otros lugares, permitiría alertar de un terremoto con antelación suficiente como para salvar vidas

Richard Allen



EN SÍNTESIS

Las redes de alerta sísmica detectan las primeras fases de un terremoto y emiten una alarma con decenas de segundos de antelación, tiempo suficiente para tomar una serie de medidas clave.

La mayoría de los sistemas se basan en que un seísmo acontece en dos etapas: una sacudida que avanza con rapidez tras la que sobreviene una onda lenta, la cual provoca la mayor parte del daño.

Una red de sismógrafos permite determinar en muy poco tiempo el epicentro del seísmo, predecir con mayor exactitud su intensidad y reducir la incidencia de alarmas falsas o fallidas.

Ya existen redes semejantes en varios lugares del mundo. El sistema propuesto para California podría estar listo en cinco años, y la inversión quedaría amortizada con creces tras el primer terremoto.

Richard Allen es profesor de geofísica y director adjunto del Laboratorio de Sismología de la Universidad de California en Berkeley. Actualmente trabaja en el prototipo de un sistema de alerta sísmico que abarque toda California.



ENTRE LOS DESASTRES NATURALES, LOS SEÍSMOS CONSTITUYEN UN CASO ÚNICO: GOLPEAN SIN NINGÚN tipo de aviso previo. El terremoto de Loma Prieta, por ejemplo, sacudió la bahía de San Francisco el 17 de octubre de 1989, justo cuando la ciudad se preparaba para el encuentro de la Serie Mundial de béisbol entre los Gigantes de San Francisco y los Atléticos de Oakland. A las 17:04, un deslizamiento de la falla de San Andrés provocó el desplome de más de dos kilómetros de una autopista de dos niveles, así como el de parte del Puente de la Bahía, entre Oakland y San Francisco. Perecieron más de 60 personas. Durante años, los expertos han intentado dar con alguna señal que, por débil que fuera, permitiese predecir con exactitud el lugar y el momento en que se desata un gran terremoto. Tras decenios de esfuerzos infructuosos, muchos dudan de la existencia de tales signos.

ILUSTRACIÓN DE TOM WHALEN

Sin embargo, aún quedan esperanzas. Un terremoto comienza con leves sacudidas que, hasta cierto punto, anuncian su intensidad y alcance. Unidos a los sistemas modernos de telecomunicaciones, los nuevos hallazgos en sismología pueden proporcionar un aviso con algunas decenas de segundos de antelación. Aunque no parece gran cosa, ese margen permite desconectar centrales eléctricas, paralizar redes ferroviarias, abrir de manera automática las puertas de los ascensores y alertar a los bomberos.

El seísmo de Loma Prieta tuvo su epicentro al sur de la bahía, en las montañas de Santa Cruz. Desde que la tierra comenzara a agitarse, las vibraciones tardaron más de 30 segundos en recorrer los 100 kilómetros que distaban hasta San Francisco y Oakland, donde la catástrofe se cobró el 80 por ciento de las víctimas. De haber existido un sistema de aviso, este podría haber llegado 20 segundos antes que el terremoto. Un tiempo así basta para decelerar y detener trenes, frustrar el aterrizaje de los aviones en aproximación final o poner en rojo los semáforos urbanos para impedir el acceso a puentes y túneles. Los trabajadores de riesgo tendrían una oportunidad para ponerse a salvo, el instrumental delicado podría llevarse a modo de suspensión para reducir daños y pérdidas, y en escuelas y oficinas daría tiempo a guarecerse bajo las mesas. En definitiva, la región quedaría mejor preparada para afrontar el desastre.

Se están instalando redes de este tipo por todo el mundo, en lugares tan diversos como México, Taiwán, Turquía y Rumanía. El sistema más avanzado del mundo se encuentra en Japón. Por todo el país, una red envía avisos a través de las emisoras de radio y televisión, los operadores de telefonía móvil y los sistemas de megafonía de centros comerciales y otros espacios públicos. En sus casi cuatro años de funcionamiento, más de una docena de terremotos han disparado la alerta y han dado a trabajadores, escolares y viajeros unos instantes preciosos para prepararse. Tras los avisos, no se han referido ataques de pánico ni accidentes de tráfico. Si bien EE.UU. no cuenta con un sistema tan avanzado, en California, donde hace ya tiempo que se espera un seísmo de enormes proporciones, se están tomando medidas para disponer en breve de un sistema de alarma.

ONDAS SÍSMICAS

La tierra bajo nuestros pies se mueve. A medida que las placas tectónicas se deslizan, los continentes se rozan y colisionan. La corteza terrestre exhibe algún grado de elasticidad, pero solo hasta cierto punto. En los bordes de las placas, la corteza se comba hasta que la tensión se hace insoportable; en ese momento, la energía acumulada durante decenios se libera, irrumpe en la superficie y sacude todo lo que encuentra a su paso.

A diario ocurren cientos de terremotos. Por fortuna, la mayoría resultan tan débiles que jamás los percibiríamos si no fuera gracias a los sismógrafos más precisos. Durante un temblor cotidiano apenas se desplazan uno o dos metros de falla, algo imperceptible para una persona. Un seísmo de intensidad 5,0 en la escala de Richter, que implica un desgarrón de entre dos y tres kilómetros, provoca una sacudida que ya se deja sentir, pero las edificaciones modernas la resisten con facilidad. A una magnitud de 8 grados o más, el desgarrón se propaga cientos de kilómetros a través del plano de la falla, puede alcanzar la superficie y partir en dos un edificio.

Al cuantificar la tensión acumulada entre un terremoto y otro, resulta posible saber qué zonas de la corteza se hallan

ASÍ FUNCIONA

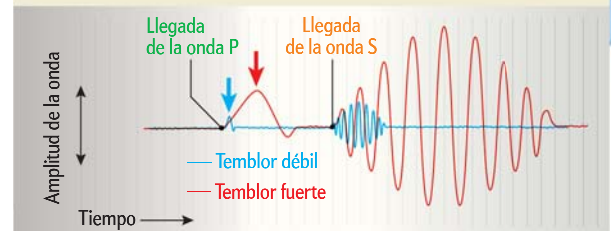
Detección sísmica

Los sistemas de alerta detectan los primeros temblores de un seísmo y activan alarmas que se anticipan a las sacudidas posteriores, mucho más violentas. El sistema ShakeAlert, propuesto para California, utilizaría una red de sismógrafos digitales distribuida por todo el estado (*derecha, arriba*) para enviar a las zonas pobladas un aviso que, según la ubicación del epicentro, podría llegar con hasta un minuto de antelación. En ese tiempo, ciudadanos, empresas y servicios públicos podrían tomar medidas preventivas clave.

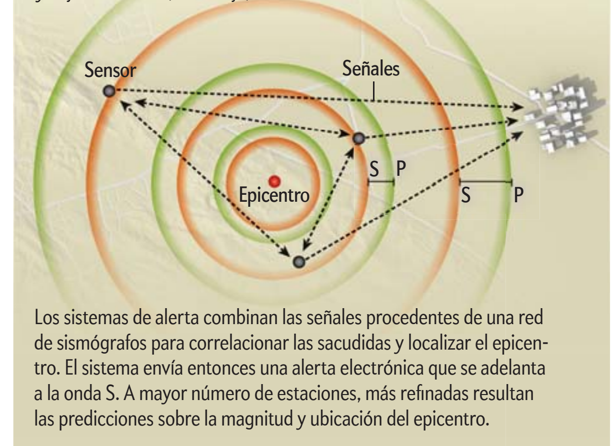
Señales que anticipan un terremoto



Todo terremoto consta de dos tipos de onda. Las ondas P comprimen el terreno a medida que avanzan, al igual que una onda acústica. Se propagan con rapidez, pero no provocan un daño excesivo. Después llegan las ondas S, cuya perturbación es transversal, como la de una ola. Son estas las que liberan la mayor parte de la energía del seísmo.



A diario se producen cientos de seísmos débiles. Los sistemas de alerta identifican los de mayor intensidad a partir del perfil de la onda P: los temblores menores producen un impulso corto y agudo (*flecha azul*); los de mayor intensidad se anuncian por una sacudida de gran amplitud y baja frecuencia (*flecha roja*).



Los sistemas de alerta combinan las señales procedentes de una red de sismógrafos para correlacionar las sacudidas y localizar el epicentro. El sistema envía entonces una alerta electrónica que se adelanta a la onda S. A mayor número de estaciones, más refinadas resultan las predicciones sobre la magnitud y ubicación del epicentro.

ILUSTRACIONES DE EMILY COOPER Y TOM WHALEN (*íconos*)

El sistema ShakeAlert propuesto para California

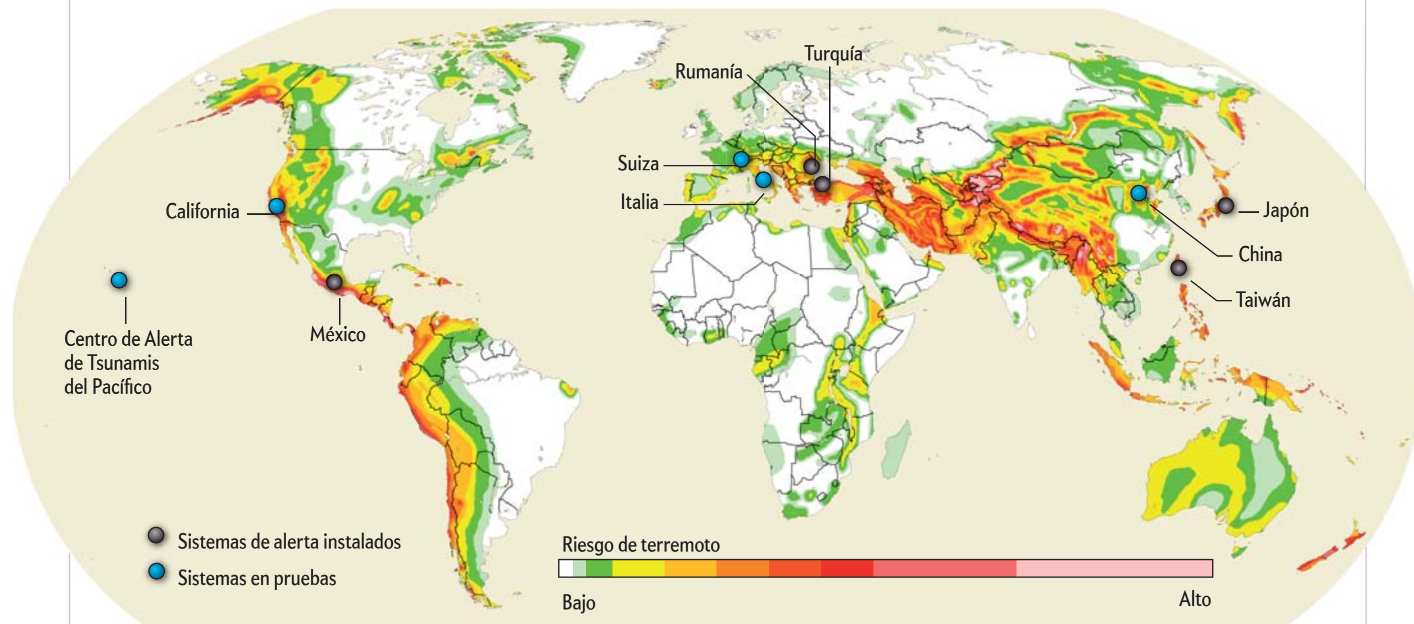
California, una de las regiones con mayor actividad sísmica del planeta, carece de un sistema de alerta básico. Universidades y otros organismos han formado un consorcio que propone extender la red sísmica hasta que cubra todo el estado. El coste del programa no superaría los 55 millones de euros, una inversión que quedaría amortizada tras el primer gran terremoto.

Sonar la alarma

Cuando el sistema detecta un fuerte seísmo, la alarma se dispara. En el ejemplo que consideramos aquí, si la falla de San Andrés detonase un terremoto con epicentro al sur de la bahía, los habitantes en las regiones más pobladas dispondrían de hasta un minuto para ponerse a salvo.

Sistemas de alerta sísmica en el mundo

En la actualidad, existen cinco sistemas de detección temprana en el mundo, cada uno de ellos adaptado a la topografía de la región en la que se encuentra. En México, una serie de sensores sobre la costa del Pacífico detectan los seísmos que nacen en la zona de subducción de placas mar adentro y disparan la alarma en Ciudad de México, una metrópolis de 20 millones de habitantes que se alza sobre un terreno que amplifica los temblores. En Rumanía, el sistema está diseñado para alertar en Bucarest de los temblores con origen en los Cárpatos, a 160 kilómetros de distancia. En Japón, toda la superficie es susceptible de sufrir terremotos. Este país posee hoy en día el sistema de alarma más avanzado del planeta.



FUENTE: «THE STATUS OF THE EARTHQUAKE EARLY WARNING AROUND THE WORLD: AN INTRODUCTORY OVERVIEW», POR RICHARD M. ALLEN, PAOLO GASPARINI, OSAMU KAMIGAICHI Y MAREN BOSE EN *SEISMOLOGICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 80, N.º 5, SEPTIEMBRE/OCTUBRE DE 2009

próximas a sufrir el colapso. Pero, en la aparición y propagación de una ruptura sísmica, juega un papel fundamental la estructura de la falla muchos kilómetros bajo tierra, la cual no puede explorarse de manera directa. Por ello, la mayoría de los expertos no creen factible diseñar un sistema que alerte con días ni horas de antelación. Por el momento, lo máximo a lo que podemos aspirar es a detectar un terremoto con la mayor rapidez posible y hacer sonar la alarma.

A ello nos ayudan algunas características singulares de los seísmos. Lo que percibimos como una sacudida prolongada sobreviene en realidad en etapas. La energía liberada se propaga de dos maneras: en forma de ondas P y en forma de ondas S. Ambos tipos de onda abandonan al mismo tiempo la superficie de la falla, pero ahí termina toda semejanza. Las P (primarias) son ondas de presión. Al igual que las acústicas, comprimen el medio en la dirección longitudinal a su avance y se propagan con rapidez, pero no poseen excesiva energía. Durante un terremoto, se perciben como un golpe repentino. Las ondas S, en cambio, se asemejan a las olas del mar: son transversales a la dirección de propagación, avanzan con lentitud y acumulan la mayor parte de la energía. El terreno oscila y pueden zarandear un edificio como si se tratase de un bote a merced del oleaje.

Pero el perfil de esas ondas no es siempre el mismo; depende de cuánto se deslice la falla. En un desplazamiento menor, las ondas P presentan una amplitud baja y una frecuencia elevada; es decir, un impulso débil y agudo. Durante un temblor más intenso, las ondas P poseen una amplitud mayor, pero su frecuencia es inferior. Vendría a ser como la diferencia entre el piar de un pájaro y el rugir de un oso. Gracias a esas características, un solo sismómetro serviría para estimar la magnitud de un temblor: la detección de ondas P de gran amplitud y baja frecuencia dispararía la alarma. Un sistema basado en una única estación constituye el método de detección más rápido en las proximidades del epicentro. Sin embargo, las irrupciones sísmicas difieren unas de otras —no todos los terremotos de grado 5 resultan iguales— y los sedimentos subterráneos pueden modificar el aspecto de las ondas P. Esa variabilidad aumenta el riesgo de falsas alarmas, así como el de avisos fallidos.

Para aumentar la fiabilidad de la detección, pueden combinarse los datos de varios sismógrafos separados unos kilómetros. Los sedimentos bajo cada uno no serían siempre los mismos, lo que permitiría promediar la magnitud estimada. El método requiere una red de detectores conectados a una estación central. El problema reside en que, durante los escasos segundos que lleva la transmisión y análisis de los datos, las destructivas ondas S pueden avanzar entre tres y cinco kilómetros. Por tanto, la mejor solución consiste en combinar la detección por parte de una sola estación con la obtenida por una red. Ello permitiría disponer de avisos rápidos en la región cercana al epicentro y, al mismo tiempo, de alertas fiables pero, asimismo, anticipadas en las áreas más distantes.

Todo sistema de alarma ha de llegar a un compromiso entre la precisión de la señal y el tiempo de aviso disponible. Cuantos más datos acumule una estación sísmica, más exac-

tas resultarán sus estimaciones, pero más tardarán en procesarse. En algunos casos resultará preferible tolerar un mayor número de falsas alarmas a cambio de contar con más tiempo de prevención. En las escuelas, por ejemplo, sería deseable una anticipación mayor a fin de que los niños dispongan de un margen suficiente para ponerse a salvo. Además, unas cuantas falsas alarmas al año servirían para entrenar la reacción ante una amenaza real. Una central nuclear, en cambio, solo necesita un segundo para detener el reactor; sin embargo, la operación implica un coste elevado. En tales casos puede esperarse algo más y asegurarse de que la alarma cuenta con fundamento.

México dispone de un sistema que detecta los seísmos en la costa y da la alerta en la capital federal. En el terremoto de 1995, el metro pudo detenerse 50 segundos antes de la llegada de la onda sísmica y las escuelas se evacuaron conforme a lo previsto

DE MÉXICO A JAPÓN

En una forma u otra, los sistemas de alarma sísmica existen desde hace décadas. Ya en los años sesenta, Japón instaló sismógrafos en los raíles de los trenes bala Shinkansen a fin de que el conductor pudiese aminorar la velocidad ante la detección de un temblor. Con posterioridad, se diseñaron sistemas que empleaban sismógrafos remotos para alertar en caso de terremotos de mayor magnitud.

México dispone de una red que detecta seísmos próximos a la costa y avisa en la capital federal, una metrópolis de más de 20 millones de habitantes y edificada sobre un lecho arcilloso que amplifica las ondas sísmicas. La distancia que media entre el litoral y la ciudad permite disparar la alarma con más de 60 segundos de antelación. La puesta en servicio del sistema se remonta a 1993. Dos años después, pasó su primera prueba importante: el 9 de octubre de 1995, un terremoto de intensidad 8,0 sacudía la costa de Manzanillo. La alarma llegó a Ciudad de México a través de las emisoras de radio y televisión, así como gracias a un canal radiofónico especializado similar al de algunos servicios meteorológicos. El metro de la ciudad pudo detenerse 50 segundos antes de que llegase la onda sísmica y las escuelas se evacuaron conforme a lo previsto.

El sistema de Japón, activo desde 2007, utiliza con profusión la tecnología personal. Las alertas no solo se reciben por televisión y radio, sino en receptores especiales en hogares, oficinas y escuelas. En los ordenadores se abren ventanas que muestran un mapa con la situación del epicentro y la propagación de las ondas sísmicas en tiempo real. Un temporizador mide cuánto queda hasta que lleguen las sacudidas e indica la intensidad estimada. Los operadores de telefonía móvil envían un texto que advierte a los usuarios, al tiempo que emite una señal sonora característica. Las localizaciones críticas (centrales nucleares, ferrocarriles, aeropuertos y factorías de productos de riesgo) disponen de sistemas de comunicación ajustados a sus necesidades.

La experiencia japonesa demuestra que los sistemas de prevención sísmica no se limitan a proteger vidas humanas, sino que también proporcionan una ayuda enorme en otros aspectos. Desde su puesta en funcionamiento, los avisos y planes de alerta en caso de terremoto han llegado a reducir las pérdidas económicas de algunas empresas hasta en más de un 60 por ciento.

LA MALDICIÓN DE CALIFORNIA

California es tierra de terremotos. En 2006, un consorcio de universidades, agencias estatales y federales nació con el objetivo de desarrollar en aquel estado el sistema de prevención ShakeAlert. A día de hoy, un prototipo conecta cerca de 400 estaciones; pronto enviará señales de alerta a un pequeño grupo de usuarios a modo de prueba. Una vez finalizado, el sistema no solo proporcionará avisos inmediatos desde una sola estación a aquellos que se encuentren en las inmediaciones del epicentro, sino también a quienes se hallen mucho más lejos, gracias a una red. En caso de éxito, se emitirán alertas durante los primeros cinco segundos tras la sacudida de una onda P.

No obstante, queda mucho hasta que California disponga de una cobertura tan completa como la de Japón. Las 400 estaciones sísmicas actuales se concentran en las áreas metropolitanas de la bahía de San Francisco y Los Ángeles, lo que deja una extensa área sin monitorizar. Aun cuando la mayoría de los californianos reside en esas zonas, los vacíos de cobertura enlentecen el sistema y reducen su precisión, ya que lleva más tiempo detectar ondas P en ciertos lugares. Japón cuenta con un detector cada 25 kilómetros a lo largo de todo el país. En California, semejante espaciado proporcionaría un rendimiento óptimo del sistema, con menos alarmas falsas o fallidas y una anticipación mayor.

Al igual que en el país nipón, las alarmas activarían los dispositivos electrónicos que la mayoría de la población lleva consigo a diario. Una alerta en el teléfono móvil anticiparía la intensidad del seísmo, el tiempo que la sacudida tardaría en llegar y quizá proporcionase indicaciones sencillas, como refugiarse bajo la mesa o dirigirse a una zona segura. Los complejos cuya infraestructura abarque zonas extensas podrían beneficiarse de un mapa que indicase el avance de la onda en tiempo real y la distribución de la sacudida sobre el terreno.

La inversión que requiere un sistema semejante es modesta en comparación con los riesgos. El coste de 100 sismógrafos adicionales y de las mejoras en la infraestructura ascendería a unos 55 millones de euros. Con ello, dentro de cinco años el sistema se hallaría operativo, y puede que dentro de seis muchos se alegrasen de contar con él.

PARA SABER MÁS

New methods and applications of earthquake early warning. R. M. Allen, O. Kamigaichi y P. Gasparini en *Geophysical Research Letters*, vol. 36, n.º 5, 2009.
Earthquake early warning. Richard M. Allen, Paolo Gasparini y Osamu Kamigaichi en *Seismological Research Letters*, vol. 80, n.º 5, septiembre/octubre de 2009.
The status of earthquake early warning around the world: An introductory overview. Richard M. Allen et al. en *Seismological Research Letters*, vol. 80, n.º 5, págs. 682-693, septiembre/octubre de 2009.
Red Sísmica Integrada de California: **www.cisn.org**

por C. G. Castro, F. G. Figueiras, U. Labarta, M. J. Reiriz y D. Zúñiga

Batea: un arrecife flotante

El cultivo del mejillón conlleva cambios en el ecosistema marino

Desde su comienzo en 1946, el cultivo del mejillón *Mytilus galloprovincialis* en las rías Baixas (Galicia) ha experimentado un crecimiento espectacular; hoy día es la región más productiva de Europa y una de las más importantes a escala mundial. El número total de bateas en Galicia es de 3337, con un 97 por ciento de ellas situadas en las rías Baixas y una producción media anual de 250.000 toneladas. El número de mejillones en cultivo suspendido en el ecosistema de las rías alcanza los 18.000 millones de individuos. Estas cifras ponen de manifiesto la gran importancia socioeconómica de dicha actividad para Galicia. En este contexto se enmarcan los diversos proyectos científicos llevados a cabo por los departamentos de oceanología y ecofisiología y cultivo de moluscos del CSIC en Vigo. Dentro de sus objetivos destaca el estudio de la interacción del cultivo del mejillón con la biogeoquímica de la columna de agua y el efecto de la deposición de heces del mejillón sobre la diversidad biológica de las comunidades bentónicas del fondo marino de las Rías.

Los diferentes estudios ponen de manifiesto que el cultivo de mejillón provoca en la columna de agua una fuerte disminución del seston, material en suspensión, con vida o sin ella, filtrado por el organismo. Se observa además un incremento en la concentración de amonio, producto de excreción del mejillón. Las altas tasas de material sedimentado, asociado a la deposición de heces, origina un aumento en la densidad de individuos epibentónicos (organismos que habitan en la superficie del fondo marino) en comparación con las zonas sin bateas. Así pues, a través de su actividad digestiva, el mejillón desvía una fracción importante de su producción primaria y energía hacia la cadena trófica bentónica. Ello conlleva cambios en el reciclado de nutrientes en la columna de agua y en los flujos de nutrientes en la interfase entre agua y sedimento, además de alterar la estructura de las comunidades que habitan el fondo marino.



Batea para el cultivo del mejillón en la Ría de Vigo.



Fondeo de una cámara bentónica bajo una batea de cultivo de mejillón con la ayuda de un buzo profesional. Este instrumento oceanográfico permite determinar las características físicoquímicas de la columna de agua.

DIANA ZÚÑIGA GARCÍA (*batea, cámra bentónica y mejillón*); DAVID VILLEGAS RÍOS (*cuerdas*)

Cuerdas de una batea sobre las que crecen los mejillones, además de otros organismos, como anémonas (*Actinothoe sphyrodeta* y *Corynactis viridis*), estrellas de mar (*Marthasterias glacialis*) y diversos tipos de algas (*Saccorhiza polyschides*)(*imagen de fondo*). La especie cultivada es *Mytilus galloprovincialis*, característica de las rías gallegas (*abajo*).



por Simon Schaffer

Simon Schaffer es profesor del departamento de historia y filosofía de la ciencia de la Universidad de Cambridge.



El señor de la física

Los trabajos sobre electromagnetismo que James Clerk Maxwell llevó a cabo en 1861, y que tanto hicieron por la unificación de distintos campos científicos, debían tanto a la tecnología como a la abstracción teórica

Hace ciento cincuenta años James Clerk Maxwell, físico escocés de 30 años, publicó la primera parte de un documento extraordinario: *On physical lines of force* («Sobre líneas de fuerza físicas»), un trabajo sobre la física matemática del electromagnetismo. Sería tentador rastrear hasta él muchos de los elementos que integran el mundo moderno, desde las telecomunicaciones a la microelectrónica, pasando por las tecnologías de la información; pero el camino recorrido desde entonces es más tortuoso de lo que parece. Para los admiradores de Maxwell, su trabajo demuestra que la ciencia desinteresada acaba siempre teniendo un gran rendimiento económico y práctico. En el Reino Unido, por ejemplo, se ha propuesto la denominación «Clerk Maxwell» para los centros públicos regionales de tecnología e innovación, que tienen el ambicioso objetivo de reducir la brecha entre la universidad y la industria.

Los partidarios de invertir más en ciencia recurren con frecuencia a este modelo lineal, en el que la teorización genera desde el aislamiento nuevas tecnologías y beneficios prácticos. Sin embargo, un informe de la Royal Society británica titulado *El siglo de la ciencia* apuntaba en 2010 que «el modelo lineal, en el que la investigación fundamental precede a la innovación, guarda escasa relación con la realidad». El informe añadía que la persistencia del modelo respondía en parte a suposiciones históricas y mitos comunes que raramente son cuestionados. El magnífico trabajo que Maxwell llevó a cabo en los años sesenta del siglo XIX constituye un ejemplo excelente: lejos de representar la progresión majestuosa desde una teoría abstracta a una aplicación sólida, fue el producto de una red de mercados, tecnologías, laboratorios y calculadores en el taller del mundo.

Mitos y matemáticas

Preguntémonos para empezar por qué trabajaba Maxwell en electromagnetismo. En los años cincuenta no era común que un matemático formado en la Universidad de Cambridge lo hiciera. El currículum de la universidad estaba centrado en ciencias más asentadas, como la mecánica celeste, la óptica ondulatoria o la hidrodinámica. Las universidades británicas ni siquiera contaban con laboratorios para la enseñanza de la física. Es significativo que el más conocido de los pioneros británicos del electromagnetismo, el profesor de la Real Institución londinense Michael Faraday, fuera un químico experimental prodigioso, un autodidacta que apenas sabía matemáticas superiores.

A diferencia de Faraday, su héroe, Maxwell podía parecer un ermitaño. Con frecuencia se retiraba a su finca escocesa de 1800 acres, donde le absorbían las tareas rurales. Llegó a ser descrito como un «señor del país del norte». Esta imagen, cultivada a conciencia por Maxwell, reforzaba la creencia en el científico brillante divorciado de los asuntos mundanos.

Sin embargo, desde su adolescencia en Galloway, en el sudoeste de Escocia, Maxwell había mostrado predilección por convertir los principios teóricos en aparatos prácticos, llegando a construir telégrafos eléctricos. Su padre le acompañó de buen grado a observar las máquinas expuestas en las ciudades industriales y en la Gran Exposición de los Trabajos de la Industria de todas las Naciones celebrada en el Palacio de Cristal de Londres en 1851. Su inventiva llamó la atención de William Thomson (futuro Lord Kelvin), por entonces un joven profesor de la Universidad de Glasgow. Se conocieron en 1850, y Thomson animó a Maxwell a fabricar cristales magnéticamente sensibles en su casa de Galloway.

Tras completar su educación matemática en Cambridge, Maxwell se veía aún como un «principiante eléctrico». Con todo, le llamaron la atención los fascinantes estudios de Faraday sobre corrientes eléctricas y polos magnéticos, de modo que recurrió a Thomson, que había abordado previamente estas cuestiones, para que él y otros graduados pudieran por fin «atacar la electricidad». El momento no podía ser más oportuno.

Problemas de comunicación

Los problemas que Maxwell y sus aliados querían resolver eran los mismos que los de un proyecto lanzado en los años cincuenta para conectar el Imperio Británico mediante un sistema telegráfico global: la propagación de señales a través de circuitos electromagnéticos, la fiabilidad de los instrumentos de medida, el análisis de la fuerza, la resistencia y la corriente. No deja de ser significativo que la teoría del campo electromagnético surgiera en la nación más preocupada por la telegrafía submarina. En el continente europeo, donde abundaban las líneas de superficie, los problemas de distorsión y retraso de la señal causados por el agua de mar no eran evidentes.

En 1853, Faraday presenció el retraso catastrófico de la señal en los cables que unían Londres y Manchester, y vio en este problema una oportunidad para difundir su teoría de la inducción electromagnética. En una conferencia impartida en la Real Institución pocos meses después, Faraday usó su teoría para demostrar que el agua de mar actuaba sobre un cable submarino de modo análogo a la armadura externa de un condensador: aumentando su capacitancia, frenando la inducción y, por tanto, retrasando aún más la señal.

Maxwell y Thomson estudiaron cuidadosamente la conferencia de Faraday y sus implicaciones para la telegrafía submarina. En pocos meses, Thomson había calculado la relación entre la longitud del cable y el retardo de la señal, y hallado una fórmula de sumo interés para los inversores del ambicioso proyecto para tender un cable submarino de 5000 kilómetros hasta América del Norte. En 1856 Thomson era ya una autoridad en sistemas electromagnéticos, director de una de las grandes empresas de telegrafía transatlántica y de un nuevo laboratorio de física en Glasgow. En los próximos años iba a ganar miles de libras con patentes telegráficas y trabajos de consultoría, más que suficiente para costearse un yate, construir una mansión señorial y dotar su universidad con becas y equipamiento. Maxwell admiraba la forma en que Thomson hacía que «su prominente ciencia contara para los ingenieros».

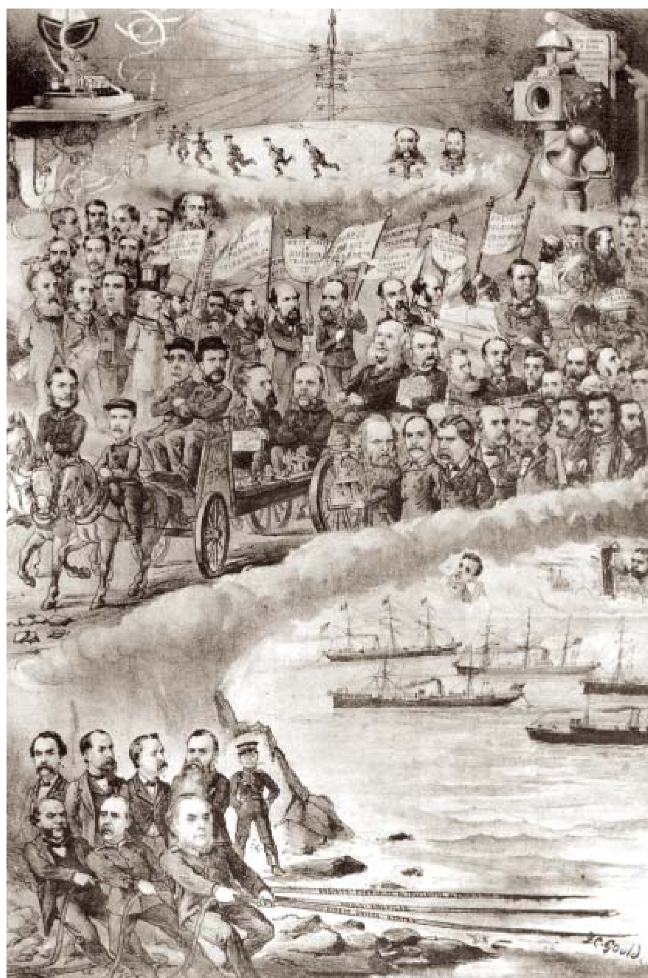
Convertido entretanto en profesor de filosofía natural en Aberdeen, Maxwell había reelaborado sin complejos el modelo de inducción electromagnética de Faraday. Para él era claro que Faraday había destruido los modelos electromagnéticos prevalentes en el continente europeo, que suponían la existencia de corpúsculos aislados que interactuaban instantáneamente a distancia a través del espacio vacío. Maxwell vislumbró que las acciones electromagnéticas dependían de algún tipo de medio fluido, un éter o campo que llenaba el espacio y era capaz de almacenar energía y transmitir las interacciones a una velocidad finita. Le llevó cuatro años de arduo trabajo, a partir de la primavera de 1857, conseguir que este modelo del electromagnetismo encajara con los mejores datos disponibles; lo empezó en Escocia y lo completó en Londres, como profesor de filosofía natural en el King's College. A diferencia de sus colegas en Francia o Alemania, los filósofos naturales británicos pensaban la física en términos de poleas, bombas, gelatina o caucho, nociones que hacían extensivas al universo.

Así había abordado Maxwell en Cambridge el estudio de la mecánica de fluidos. Su artículo de la primavera de 1861 en *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* representaba el espacio de las líneas de fuerza magnéticas de Faraday como una gran matriz de engranajes giratorios separados por largas hileras de rodamientos de bolas.

Ecuaciones mecánicas

El mismo artículo contiene las primeras versiones de las ecuaciones que caracterizan el campo electromagnético, distribuidas en las distintas secciones del argumento. Pero pasaría mucho tiempo antes de que fueran reconocidas como las ecuaciones fundamentales de un nuevo sistema electromagnético. Las ecuaciones resumían los principios establecidos por los experimentadores europeos en las décadas anteriores: el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada es proporcional a la carga eléctrica que encierra; no existen polos magnéticos aislados; la corriente eléctrica en un circuito cerrado está relacionada con el campo magnético alrededor del circuito, y la inducción electromagnética varía con el tiempo. Maxwell añadió una noción propia, la de la corriente de desplazamiento generada por la variación en el tiempo de la fuerza eléctrica, aun en el espacio aparentemente vacío.

Mediante su modelo de 1861, Maxwell demostró que era posible ajustar un mecanismo complejo, formado por engranajes y ruedas, de modo que se comportara como el electromagnetismo. La energía magnética era almacenada en forma de energía cinética de los engranajes giratorios, que a su vez, al girar, representaban la generación de corrientes por los campos magnéticos. Satisfecho con la publicación de estos resultados, Maxwell pasó el verano de 1861 en su finca rural. A lo largo de los próximos meses, sin embargo, su valoración del significado de su propio trabajo iba a cambiar sustancialmente.



WEIDENFELD Y NICOLSON

Caricatura de 1883 en la que aparecen físicos, ingenieros y banqueros codo con codo.

Ese verano, los problemas del telégrafo preocupaban a los físicos británicos. A raíz del fracaso del primer intento de tender un cable trasatlántico, la Asociación Británica para el Progreso de las Ciencias había asignado a un comité la tarea de determinar los estándares de resistencia eléctrica que permitieran funcionar al sistema telegráfico. Maxwell se incorporó entusiasmado al comité. En menos de un año, las mediciones electromagnéticas predominaban en los nuevos laboratorios de enseñanza del Reino Unido, entre ellos el de Thomson en Glasgow y, más adelante, el Laboratorio Cavendish de Cambridge, dirigido por Maxwell.

En Escocia, durante el verano de 1861, Maxwell no dejó de reflexionar sobre su modelo fluido de engranajes y ruedas. Las mediciones técnicas de precisión dictaban algunos de los parámetros de su estructura. Maxwell se dio cuenta de que su medio fluido debía transmitir acciones mediante ondas transversa-

les, igual que lo hacían el caucho o la gelatina. Podía calcular la velocidad de las ondas a partir de la densidad y la rigidez del medio, que a su vez podían determinarse en el laboratorio midiendo las fuerzas electrostática y electromagnética. De vuelta en Londres, obtuvo las más recientes medidas electromagnéticas realizadas en Alemania y las introdujo en sus ecuaciones. Evidentemente sorprendido, descubrió que la razón entre las unidades electrostática y electromagnética no difería en más del 1 por ciento del valor de la velocidad de la luz medida en París una década antes. «La coincidencia no es meramente numérica», le dijo a Faraday ese otoño. Todo indicaba que la luz era una vibración del medio responsable del electromagnetismo. Esta intuición permitió a Maxwell unificar los fenómenos aparentemente distintos de la luz y el electromagnetismo, y cambiar la física para siempre.

Las cuestiones prácticas relacionadas con la comunicación telegráfica condicionaron asimismo la recepción de los descubrimientos de Maxwell. Hasta su temprana muerte en 1879, en un período de su vida extremadamente fértil y creativo, Maxwell intentó convertir su modelo mecánico del campo electromagnético en una teoría dinámica generalizada de la acción electromagnética. Pero a pesar de su importancia para la física y la comprensión moderna de todos los tipos de radiación, la teoría de Maxwell no se impuso sin dificultades.

Uno de sus críticos más severos no fue otro que Thomson, que nunca llegó a perdonar a Maxwell el que hubiera abandonado el lenguaje de los mecanismos complejos en favor de una notación algebraica abstracta. El electromagnetismo de Maxwell era para Thomson «un gran paso atrás», por no decir una forma de «nihilismo». Una de las razones de sus discrepancias era que, de entrada, habían concebido de manera muy distinta las señales telegráficas. Maxwell sostenía que las investigaciones iniciales de Faraday sobre la distorsión de la señal precisaban un tratamiento unificado de la inducción, la conducción y el medio circundante; los modelos telegráficos de Thomson, en cambio, analizaban por separado la conducción a través del cable y la inducción a través del aislante que lo recubría.

En 1884, cinco años después de la muerte de Maxwell, Thomson llegó a afirmar públicamente que había descubierto la teoría electromagnética de la luz antes que él, refiriéndose a su análisis de la propagación de la señal en cables submarinos. Al parecer, Thomson confundía la velocidad de la luz en el campo electromagnético, la especialidad de Maxwell, con la velocidad de la señal en un cable submarino, su propia especialidad. El físico irlandés George Francis Fitzgerald, uno de los jóvenes discípulos de Maxwell, se sintió obligado a protestar en *Nature* «para evitar un error» que le parecía «muy común. El vínculo entre la ingeniería telegráfica y la teoría electromagnética sobrevivió a Maxwell.

En el prefacio a su obra maestra de 1873, el *Tratado sobre electricidad y magnetismo*, Maxwell reconoció su deuda con la telegrafía, al argumentar que daba «un valor comercial a las medidas eléctricas de precisión» y permitía realizar experimentos «a una escala que transciende en mucho la de un laboratorio ordinario», ya sea público o privado. La telegrafía proporcionó efectivamente un apoyo crucial a la teoría de Maxwell, a través de la medición de las unidades electrostática y electromagnética realizadas entre 1868 y 1869.

Maxwell aceptó dirigir el nuevo laboratorio de física de Cambridge movido en parte por la necesidad de recursos propios de la ingeniería. Afortunadamente, en los años setenta, los profesores de matemáticas de Cambridge incluían la telegrafía submarina en su nueva asignatura sobre electromagnetismo maxwelliano.

Crecimiento ordinario

Debemos concluir que *On physical lines of force* tal vez no sea el texto más apropiado para ejemplificar la pureza inquebrantable de la ciencia física. Las fórmulas de Maxwell no adoptaron su forma actual sino 25 años después de su publicación. Las cuatro célebres ecuaciones que relacionan las fuerzas y flujos electromagnéticos deben su formulación vectorial, simple y elegante, a un brillante telegrafista londinense, Oliver Heaviside, que en 1885 las publicó en *The Electrician*, una revista dirigida a empresarios e ingenieros telegráficos.

Heaviside era un veterano de las campañas del cable submarino de los años sesenta que necesitaba herramientas matemáticas para gestionar la transmisión de energía sin distorsiones o pérdidas. Independientemente del telegrafista solitario, un joven físico alemán, Heinrich Hertz, estableció de forma simultánea las mismas expresiones simplificadas de las ecuaciones de campo. Los problemas prácticos contribuyeron a dar a estas bellas expresiones su forma matemática más común y, en apariencia, más abstracta. Por un tiempo no se las conoció como las ecuaciones de Maxwell, sino de Hertz-Heaviside.

El físico francés Pierre Duhem vio en esta nueva física el signo del utilitarismo industrial de los *rosbifs*. Ante un manual maxwelliano, Duhem se quejó de que «creíamos entrar en el hogar ordenado y tranquilo de la razón, pero nos encontramos en una fábrica». Pese a la sátira, Duhem había acertado: los intereses de la investigación científica guardaban una estrecha y compleja relación, como bien sabían los victorianos, con el comercio, la industria y la tecnología.

Una caricatura de 1883 aparecida en una popular revista financiera muestra a los físicos británicos marchando codo con codo con banqueros, ingenieros, editores y agentes de bolsa. La leyenda, «magnates del telégrafo y el teléfono» [en el original con el juego de palabras *magn(et)ates*], hacía referencia a la amenaza que el teléfono de Thomas Edison representaba para el cable telegráfico. En su última conferencia pública, Maxwell presentó el teléfono a su audiencia de la Universidad de Cambridge, haciendo que transmitieran una interpretación de la canción *Men of Harlech* desde el Museo Sedwick de Geología, a través de la ciudad, hasta la Casa del Senado. Y concluyó que el vínculo entre «las corrientes en el teléfono que producen un efecto audible» y el electromagnetismo de precisión respondía «al crecimiento ordinario de los principios científicos». Los triunfos de Maxwell de hace 150 años todavía tienen mucho que enseñarnos sobre el funcionamiento de este «crecimiento ordinario».

Artículo original: *Nature* 471, págs. 289-291, marzo 2011

PARA SABER MÁS

Victorian metrology and its instrumentation: a manufactory of ohms. R. Bud y S. Cozzens, eds. en *Invisible connexions: instruments, institutions and science*, SPIE Press, págs. 23-56; Bellingham, 1992. Reimpreso en *The Science Studies Reader*, Mario Biagioli, ed., págs. 457-78, Routledge; Londres, 1999.

Escritos científicos. James Clerk Maxwell. Edición de José Manuel Sánchez Ron. CSIC; Madrid, 1998.

Materia y movimiento. James Clerk Maxwell. Edición de José Manuel Sánchez Ron. Crítica; Barcelona, 2006.

Trabajos de cristal. Ensayos de historia de la ciencia, 1650-1900. Simon Schaffer. Recopilación dirigida por Juan Pimentel. Marcial Pons; Madrid, 2010.

por Hank Greeley

Hank Greeley ocupa la cátedra de derecho Deane F. y Kate Edelman Johnson y es profesor de genética en la Universidad Stanford. Está especializado en cuestiones éticas, legales y sociales derivadas del avance de las biociencias.



Juro decir la verdad

Los escáneres cerebrales no deberían utilizarse como detectores de mentiras mientras no se demuestre su fiabilidad

Los neurólogos utilizan desde hace tiempo los escáneres cerebrales para aprender a leer la mente. Esta investigación está aumentando nuestra comprensión básica del cerebro humano y nos ofrece la esperanza de conseguir nuevos avances médicos. Todos deberíamos reconocer la importancia de este trabajo. Sin embargo, algunas empresas están empezando a aplicar los resultados de esta investigación a la detección de mentiras, vendiendo sus servicios. La técnica resulta tentadora, pero, antes de aceptarla, deberíamos pensar mucho sobre ello... e ir más despacio.

El problema no reside en la velocidad de la investigación. Los neurólogos llevan casi diez años publicando artículos sobre la detección de mentiras mediante resonancias magnéticas funcionales. Unos 25 estudios han hallado correlación entre las ocasiones en las que los sujetos experimentales mentían y el patrón del flujo de sangre en su cerebro. El problema estriba en que los diversos estudios, utilizando métodos diferentes, han sacado conclusiones basadas en la actividad de regiones cerebrales distintas. Y, además, todos los estudios realizados hasta la fecha han tenido lugar en el entorno artificial del laboratorio, con personas que sabían que estaban participando en un experimento y que mentían porque se les había pedido que lo hicieran. Ninguno de los trabajos examinó la detección de mentiras en situaciones del mundo real. Ninguna agencia gubernamental ha encontrado que el método funcione y ningún organismo independiente ha comprobado este enfoque. Sin embargo, hay gente que encarga informes sobre detección de mentiras, envueltos en el *glamour* de la ciencia, para intentar demostrar su sinceridad. En mayo de 2010, dos casos terminaron en los tribunales estadounidenses.

Uno de los casos dependía de si la técnica se consideraba fiable o no. En un tribunal federal de distrito de Tennessee, el demandado en un caso de fraude del sistema Medicare de sanidad pública quería que se admitiera como prueba un informe de detección de mentiras mediante resonancia magnética funcional, para demostrar que no había tenido la intención de cometer un fraude. Después de más de doce horas de declaraciones de testigos expertos, el juez decidió que el informe no debía ser admitido como prueba. Encontró, con razón, que no se conoce la precisión del método en un entorno real, que no hay estándares que establezcan cómo utilizar el método y que la comunidad científica no acepta en general esta aplicación de la técnica.

En el otro caso se debatía si deberíamos utilizar la técnica de marras, supuesto que funcione. El demandante en un caso civil ante un tribunal estatal en Brooklyn, Nueva York, quería que se aceptase como prueba un informe basado en resonancias magnéticas funcionales, para mostrar que su testigo principal estaba diciendo la verdad. El juez dictaminó, en ese caso, que la credibilidad de un testigo de los hechos solo debía ser determinada por el jurado; las declaraciones de testimonios expertos sobre la credibilidad de un testigo eran inadmisibles, fueran fiables o no.

Esos jueces tomaron buenas decisiones. Sin embargo, decenas de miles de jueces estadounidenses podrían tener que tomar sus propias decisiones sobre esta técnica, en ocasiones después de escuchar a buenos abogados y a testigos expertos, pero en otras sin ningún tipo de ayuda. Y lo que reviste mayor importancia, millones de personas podrían verse afectadas por el uso de estos informes de detección de mentiras al margen de los tribunales: en investigaciones penales, en tratos comerciales, quizás en el ejército o en las agencias de inteligencia e incluso en el amor y el matrimonio.

Antes de que la técnica empiece a implantarse en nuestra sociedad, debemos responder, con mayor profundidad, a las



ANN CUTTING/GETTY IMAGES

cuestiones a las que se enfrentaron esos jueces. Deberíamos prohibir el uso ajeno a la investigación de las neuroimágenes para la detección de mentiras hasta que se haya demostrado, mediante pruebas rigurosas, independientes y científicas, que el método es eficaz. De otro modo, corremos el riesgo de perjudicar a muchas personas y de empañar el buen nombre de la neurología [*Véase* «La neurociencia en el sistema judicial», por Michael S. Gazzaniga, *en este mismo número*].

No sé si la resonancia magnética funcional conseguirá superar alguna vez esas pruebas. Si lo hiciera, ¿cómo y cuándo la usaríamos? ¿Obligaríamos a los demandados a someterse a ella? ¿Y a sospechosos, terroristas, estudiantes con mala conducta, adolescentes o pasajeros problemáticos para la seguridad de los aeropuertos? La detección de mentiras no constituye el único uso de los escáneres cerebrales en relación con la lectura de la mente que podría resultar útil para los profesionales del Derecho. Los científicos están trabajando en formas de detectar el dolor, los prejuicios y los recuerdos. Al final, podríamos tener que decidir si rechazar o aceptar estas técnicas. En cualquier caso, debemos prepararnos para ellas.

por Pere Castells



Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.

La destilación llega a la cocina

El vacío permite destilar a bajas temperaturas y con ello preservar los aromas

Entre los cocineros siempre ha existido la incógnita de cómo conseguir retener los aromas que se desprenden de determinados productos o elaboraciones, como unas fresas recién recogidas, el café, el cacao o, por qué no, de unas gambas a la plancha...

Una de las propuestas que permiten resolver esa cuestión consiste en utilizar un aparato que técnicamente recibe el nombre de rotavapor. Se trata de un destilador que suele emplearse en los laboratorios de química para recuperar disolventes aplicados en procesos de extracción. Su versión culinaria se denomina «rotaval» (nombre que nace de la fusión de los términos rotavapor y Alicia, el centro de investigación sobre alimentación y ciencia en donde se ha desarrollado). El aparato consiste en un destilador en rotación acoplado a una bomba de vacío. Tras un proceso de evaporación y posterior condensación se obtiene un líquido, el destilado, en donde se han concentrado los aromas frescos. En el balón queda la sustancia remanente, o reducción, que ve aumentada su viscosidad debido a la pérdida de disolvente.

El punto de ebullición de una sustancia varía con la presión. A menor presión, menos energía (calor) necesita esta para evaporarse y, por tanto, menor es la temperatura a la cual se produce su ebullición. A presión atmosférica, un líquido acuoso presenta el punto de ebullición a unos 100 ºC. En las condiciones de depresión del rotavapor (vacío continuo), en cambio, la ebullición se produce a temperaturas notablemente inferiores. Ello permite extraer sustancias aromáticas sin que estas se degraden por la acción del calor. Líquidos muy acuosos, como zumos de fruta, por ejemplo, destilan a entre 25 y 40 ºC.

En la cocina, tan interesante puede ser el destilado como la reducción. En el destilado van a parar los aromas más volátiles, las moléculas que se evaporan con mayor facilidad y que, refrigeradas convenientemente, permanecen en el agua del destilado. En la reducción se obtienen los componentes con mayor punto de ebullición, moléculas que hacen espesar la elaboración reducida. A partir de frutas licuadas se obtienen reducciones viscosas de sabor muy fresco y, en general, ácidas, que guardan semejanza con las mermeladas; sin embargo, su elaboración no requiere la aplicación de altas temperaturas ni la adición de azúcares.



La destilación a bajas temperaturas permite elaborar platos con un gran protagonismo aromático, como esta colección titulada *Otoño* (2007), a base de regaliz, trufa, remolacha y setas.

El uso culinario de destilados y reducciones obtenidos mediante rotavapor se inició en 2004, cuando los hermanos Roca, en su restaurante de El Celler, se empeñaron en obtener aromas de cacao, café, fresas y muchos otros productos alimentarios. Se les ocurrió entonces la idea de introducir en el aparato tierra de bosque con agua. El destilado resultante: agua con sabor a tierra. Tras analizar el producto y comprobar que era comestible, prosiguieron la adaptación a la cocina del aparato de destilación. En 2005 se sirvieron ostras con destilado de tierra, un «mar y montaña esencial», puesto que unía, mediante ingredientes básicos, el fuerte sabor a mar de la ostra con el de la tierra del bosque —máxima representatividad con los mínimos componentes—. Lo más interesante es que, sin haberlo degustado nunca, todo el mundo identifica el sabor a tierra. Esta idea abrió el camino de los aromas del paisaje que llevó a la destilación de alfalfa, que se combinó con caracoles.

Técnica y aparato se han ido expandiendo desde entonces. En 2006 empezó a comercializarse el «rotaval», que ha dado lugar a elaboraciones míticas como la ya mencionada *Ostra con destilado de tierra de sotobosque* (2005). Se trata, simplemente, de una ostra bañada con destilado de tierra espesado en frío con xantana. O el *Dry gambini* (2007), elaborado con destilado, reducción y desecado de gambas junto con ginebra.

El estudio sobre la aplicación gastronómica del rotavapor se enmarca dentro de proyectos como Futural (contribución de las nuevas tecnologías a la obtención de nuevos alimentos). Esta iniciativa, en la que participan varias empresas del sector alimentario, institutos de investigación y universidades, se propone sentar las bases científicas para la aplicación de nuevas técnicas en la elaboración de alimentos del futuro y así adaptarlos a las nuevas necesidades de consumo.

Es pronto todavía para saber si algunas de las ideas surgidas desde la cocina sobre destilados y reducciones a baja temperatura llegarán a la población en general. Con todo, ya han sido motivo de comentarios en publicaciones de alcance internacional, como el artículo publicado el 1 de diciembre de 2009 por el experto en gastronomía y química culinaria Harold McGee en su sección «The curious cook» del *New York Times*, en el que ofrece una disertación sobre esta técnica.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares
de *MENTE Y CEREBRO* o *TEMAS*
por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
El origen de la vida, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, El tiempo, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo
T-52: El origen de la vida
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 7,00€



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00€



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

Por cada tramo o fracción de 5 productos
España: 2,80€ Otros países: 14,00€

Oferta Colección BSA
España: 7,00€ Otros países: 60,00€

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

BIOLOGÍA

CONMEMORACIÓN DE LOS NOBEL

Unos veinte premios nóbel se van a reunir este mes para compartir su saber con jóvenes investigadores. Para resaltar el acontecimiento, reproducimos aquí fragmentos de artículos publicados por nóbeles en nuestra revista

Recopilación de Ferris Jabr

TODOS LOS AÑOS, CIENTÍFICOS GALARDONADOS CON UN PREMIO Nobel se reúnen en la villa alemana de Lindau para debatir en grupo, presentar ponencias o conversar en términos informales (www.lindau-nobel.org). Este año, desde el 26 de junio al 1 de julio, van a participar unos 20 laureados por sus trabajos de fisiología o medicina, junto con otros 550 talentos en alza, seleccionados en más de 60 países. Para celebrar el acontecimiento, reproducimos extractos de algunos artículos memorables escritos en nuestra publicación por nóbeles de biología o ciencias afines (en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA desde 1976 y en *Scientific American* antes de esa fecha). Estos extractos establecen vínculos, en parte superpuestos, entre los descubrimientos y avances logrados en biología celular, medicina, etología y neurología desde mediados del siglo xx. Para facilitar la lectura, no se indican las partes de texto eliminadas de los artículos.

EN SÍNTESIS

Ganadores de premios Nobel de fisiología o medicina se van a reunir, a finales de junio, en Lindau, con varios centenares de jóvenes científicos.

Para honrar este acontecimiento, publicamos extractos de artículos que escribieron para nuestras páginas científicos laureados con el Nobel.

Los extractos dedicados a la célula se ocupan del origen y estructura de moléculas orgánicas cruciales, así como de la aparición de las células complejas.

Otros temas tratados son la causa de las enfermedades, el comportamiento animal y el modo en que el cerebro opera y da lugar a la mente.

ILUSTRACIONES DE MONTSE BERNAL

ALFR·
NOBEL

NAT·
MDCCC
XXXIII
OB·
MDCCC
XCVI

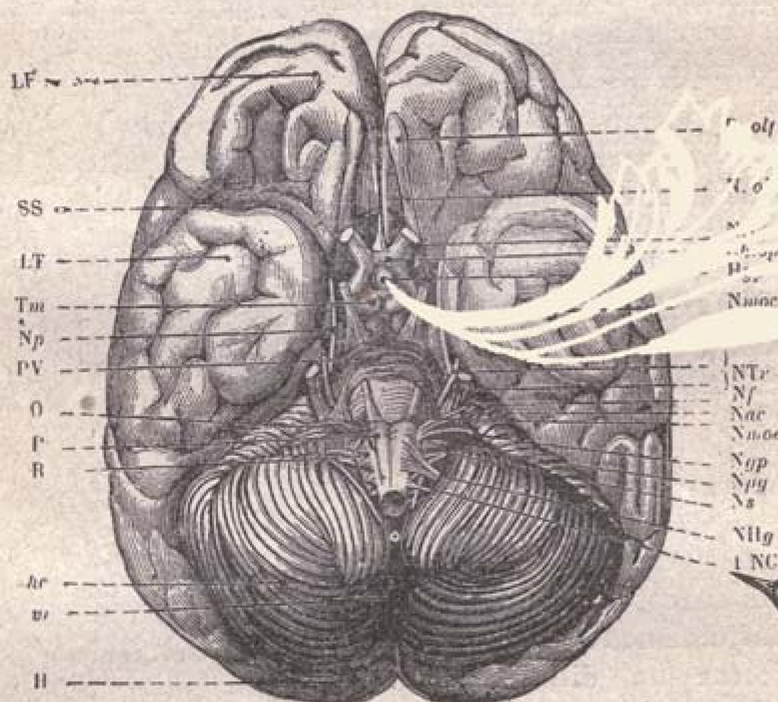


Fig. 143. Cara inferior del encéfalo



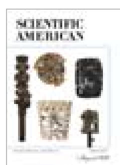
La célula viva

La fascinación que despiertan la evolución y el funcionamiento de las células es infinita, como se pone de manifiesto en los párrafos que describen la aparición de las moléculas orgánicas, el efecto de la estructura del ADN en su función y el origen de las células complejas.

El origen de la vida



Por George Wald (premio Nobel en 1967)



Publicado en agosto de 1954

Las moléculas orgánicas constituyen un conjunto enorme y formidable, infinito en sus variedades y de una complejidad apabullante. Para comprender el modo en que se generaron los organismos, antes de nada debemos explicar el origen de esas complicadas moléculas. La formación de un organismo no solo exige una tremenda variedad de esas sustancias, en las cantidades y proporciones correctas, sino también una organización apropiada de las mismas. Aquí la estructura resulta tan importante como la composición, ¡y qué complicada es la estructura! La máquina más compleja diseñada por el hombre —consideremos un cerebro electrónico— representa un juego de niños en comparación con el organismo vivo más sencillo.

En tiempo reciente, Harold Urey, premio Nobel de Química, se ha interesado por el efecto de las descargas eléctricas de las capas altas de la atmósfera sobre la formación de compuestos orgánicos.

Uno de sus estudiantes, S. L. Miller, llevó a cabo un sencillo experimento: durante una semana hizo circular sin parar una mezcla de vapor de agua, metano (CH_4), amoníaco (NH_3) e hidrógeno —gases que supuestamente existían en la atmósfera primitiva de la Tierra— en torno a un dispositivo que producía descargas eléctricas. La circulación se mantenía haciendo hervir agua en un extremo del aparato y condensándola en el otro. Al finalizar la semana se analizó el agua con el minucioso método de la cromatografía en papel. Se descubrió con sorpresa que se había formado una mezcla de aminoácidos. En la disolución se identificaron claramente la glicina y la alanina, los aminoácidos más sencillos y más abundantes en las proteínas, y había indicios de la presencia de ácido aspártico y otros dos aminoácidos. El rendimiento de la reacción fue extraordinariamente elevado. Ese asombroso resultado cambió de golpe nuestras ideas sobre la probabilidad de la formación espontánea de aminoácidos.

Hace poco se han publicado varios trabajos destacables sobre la producción espontánea de varios tipos de estructuras biológicas a partir de moléculas proteicas. El cartílago y el músculo representan algunos de los patrones estructurales más complejos y regulares que hallamos en los organismos. Cuando se observa al microscopio electrónico una fibra de esos tejidos, se descubre una bella disposición de estrías entrecruzadas, con diversas anchuras y densidades, espaciadas de forma muy regular. Las proteínas que componen estas estructuras pueden disolverse en medio acuoso, que luego se agita para que se orienten de manera aleatoria. Sin embargo, al precipitar en las condiciones adecuadas, las moléculas se van alineando una tras otra para regenerar con extraordinaria fidelidad la configuración original identificada en los tejidos.

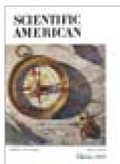
Disponemos, por tanto, de una base genuina para pensar que las moléculas presentes en el caldo oceánico primitivo no solo se agruparon espontáneamente para formar agregados sino que, al hacerlo, también adquirieron diversos tipos y niveles de orden.

BETTMANN/CORBIS (*Wald*)

La estructura del material hereditario



Por F. H. C. Crick (premio Nobel en 1962)



Publicado en octubre de 1954

Hoy en día sabemos que el ADN consiste en una cadena muy larga formada por azúcares y grupos fosfato que se van alternando. El azúcar es siempre la desoxirribosa. Mientras que la cadena azúcar-fosfato es perfectamente regular, la molécula en su conjunto no lo es porque cada azúcar lleva una «base» unida a ella. Por lo general se identifican cuatro tipos distintos de bases: dos de ellas son purinas, la adenina y la guanina, y las otras dos son pirimidinas, la timina y la citosina. Se sabe hasta ahora que las bases siguen un orden irregular a lo largo de la cadena, que probablemente varía de un fragmento de ADN a otro. Aunque la fórmula química del ADN nos indica que se trata de una cadena, ese dato por sí solo no nos informa sobre la forma de la molécula, porque la cadena, con múltiples enlaces sencillos en torno a los cuales gira, puede enrollarse y adoptar todo tipo de configuraciones.

J. D. Watson y yo, por entonces en la unidad del Consejo Británico de Investigación Médica en el laboratorio Cavendish de Cambridge, estábamos convencidos de que podríamos aproximarnos a la estructura del ADN. Pretendíamos hacerlo mediante la construcción de modelos a escala basados en los patrones de difracción de rayos X obtenidos por el grupo de M. H. F. Wilkins y Rosalind Franklin en el King's College de Londres. Pero antes debíamos hacer algunas suposiciones. La más importante, que la repetición cristalográfica no coincidía con la de los componentes químicos de la cadena, sino que se producía a intervalos mucho más largos. Una posible explicación sostenía que todos los enlaces de la cadena eran iguales pero que los rayos X solo detectaban un enlace de cada diez cuando se observaban desde un determinado ángulo y que los otros enlaces solo se identificaban desde ángulos distintos. ¿Qué tipo de cadena podría dar lugar a ese patrón? La respuesta era sencilla: la cadena debía estar enrollada formando una hélice. En ese caso, la distancia entre las repeticiones cristalográficas correspondería a la distancia que hay en la cadena entre una vuelta de la hélice y la siguiente.

En ese modelo, un par de cadenas de ADN se hallan enrolladas en torno a un eje común. Las dos cadenas se juntan entre sí por medio de sus bases. Una base de una de las cadenas se une mediante enlaces muy débiles a una base situada a la misma altura en la otra cadena, y todas las bases se emparejan de esta forma a lo largo de la estructura. Paradójicamente, para que la estructura presentara la máxima simetría debíamos hacer que las dos cadenas se orientaran en sentidos opuestos.

Entonces nos dimos cuenta de que no podíamos colocar las bases en un orden cualquiera; las cuatro bases solo encajarían en la estructura si formaban ciertos emparejamientos. En cualquiera de ellos siempre debía existir una base grande (una purina) y otra pequeña (una pirimidina). La unión de dos pirimidinas resultaría demasiado pequeña como para rellenar el hueco entre las dos cadenas, mientras que la de dos purinas sería demasiado voluminosa como para encajar en ese espacio. Además, la adenina debía emparejarse con la timina, y la guanina, con la citosina.

Lo fascinante del modelo es que permite imaginarse enseguida el modo en que el ADN producirá una copia exacta de sí mismo. La estructura consta de dos partes, cada una de ellas complementaria de la otra. Por tanto, cualquiera de las cadenas podría actuar como un molde sobre el que se sintetiza la cadena asociada. Supongamos que las dos partes de una molécula de ADN se desenrollan y se separan. Cada una empieza a fabricar una nueva cadena complementaria sobre sí misma. Cuando se completa el proceso, existen dos pares de cadenas donde antes solo había uno. Además, gracias al emparejamiento específico de las bases, la secuencia de los pares de bases se habrá duplicado de forma exacta; en otras palabras, el molde no solo habrá ensamblado los materiales de construcción, sino que también los habrá colocado en el orden correcto.

Otros artículos de F. H. C. Crick en IyC
ADN superenrrollado, 9/1980.

El origen de las células eucariotas



Por Christian de Duve (premio Nobel en 1974)



Publicado en junio de 1996

Hace unos 3700 millones de años aparecieron sobre la Tierra los primeros seres vivos. Eran microorganismos pequeños, unicelulares, no muy distintos de las bacterias actuales. Los procariotas alcanzaron pleno éxito en su desarrollo y multiplicación. Gracias a su notable capacidad de evolución y adaptación, dieron origen a una amplia diversidad de especies e invadieron cuantos hábitats el planeta podía ofrecerles. La biosfera estaría repleta de procariotas si no se hubiera dado el avance extraordinario del que surgió una célula perteneciente a un tipo muy distinto: eucariota, es decir, que posee un núcleo genuino. En nuestros días, todos los organismos pluricelulares están constituidos por células eucariotas. Las células eucariotas surgieron con toda probabilidad de antepasados procariotas. Pero, ¿cómo?

Para poder apreciar esa asombrosa trayectoria de la evolución necesitamos conocer, siquiera en grandes líneas, las diferencias fundamentales entre ambos tipos de células. Las eucariotas tienen un tamaño mucho mayor que las células procariotas (en términos de volumen, unas 10.000 veces). En las células procariotas todo el acervo genético se halla constituido por un solo cromosoma, formado por una ristra de ADN circular que está en contacto directo con el resto de la célula. En las células eucariotas la mayor parte del ADN se almacena, de un modo mucho más estructurado, en los cromosomas. Estos se agrupan a su vez dentro de un recinto central bien definido, el núcleo. Además, la mayoría de las células eucariotas se distinguen de las procariotas por la existencia, en su citoplasma, de varios millares de estructuras organizadas, los orgánulos, cuyo tamaño viene a ser el de una célula procariota. Entre los orgánulos, destacan los peroxisomas (que realizan diversas funciones metabólicas), las mitocondrias (centrales energéticas de las células) y, en las algas y células vegetales, los plastos (donde acontece la fotosíntesis).

Desde hacía más de un siglo, venían los biólogos sospechando que las mitocondrias y los plastos descendían de bacterias adoptadas por alguna célula hospedadora como endosimbiontes (etimológicamente, «vivir juntos en el interior»). Los datos más convincentes son la presencia en estos orgánulos de un sistema genético vestigial, aunque funcional. Ese sistema abarca genes vinculados al ADN, los medios necesarios para replicar el ADN y las herramientas moleculares requeridas para la construcción de proteínas a partir de los planos escondidos en el ADN. A menudo, se presenta la adopción endosimbiótica cual si se tratara del resultado de algún tipo de encuentro —predación agresiva, invasión pacífica, asociación o fusión mutuamente beneficiosa— entre dos procariotas típicos. Hay una explicación mucho más directa, que la propia naturaleza sugiere. De acuerdo con ella, los endosimbiontes fueron engullidos para alimentación de una célula de dimensiones mucho mayores, que había adquirido ya muchas de las propiedades que hoy definen a las células eucariotas. Muchas células eucariotas actuales —los leucocitos, por ejemplo— engullen procariotas. A veces escapan a la destrucción, continúan dañando a los captores y llegan incluso a causarles la muerte. En alguna rara ocasión, captor y víctima sobreviven en un estado de mutua tolerancia, que puede tornarse después en asistencia recíproca y, por último, incluso en dependencia. Mitocondrias y plastos podrían así haber sido huéspedes permanentes de una célula que los albergó.

Otros artículos de C. de Duve en IyC
Las restricciones del azar, 2/1996.

GETTY IMAGES (*Crick*); CORTESÍA DE LA UNIVERSIDAD ROCKEFELLER (*de Duve*)



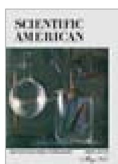
Las raíces de la enfermedad

Algunos premios Nobel que han escrito para nuestra revista nos han ayudado conocer mejor algunos microorganismos y moléculas responsables de terribles enfermedades.

Virus



Por F. M. Burnet (premio Nobel en 1960)



Publicado en mayo de 1951

Se puede definir un virus como un microorganismo, más pequeño que la mayoría de las bacterias, que se multiplica únicamente en el interior de las células vivas de un huésped vulnerable. Para detener una enfermedad vírica casi siempre resulta necesario conocer el equilibrio natural entre el virus y el huésped y el modo en que se puede desplazar ese equilibrio en una dirección u otra, bien mediante un accidente biológico o la intervención humana. En los esfuerzos por aproximarse a ese conocimiento han surgido dos importantes conceptos relacionados entre sí: la «infección subclínica» y la «inmunización».

Una infección subclínica es aquella en la que el paciente no manifiesta ningún signo de la enfermedad. En una población afectada por una enfermedad infecciosa, el número de casos con infección subclínica suele superar ampliamente el de los casos más graves, con síntomas inequívocos de la enfermedad. Así, cuando un niño padece un ataque paralizante de poliomielitis, un examen cuidadoso del resto de la familia revelará la presencia del virus en el intestino de los demás niños durante una o dos semanas. Pero en ellos no aparecerá ningún síntoma, o solo sufrirán una enfermedad leve e indefinida. Por fortuna, una infección subclínica aumenta la resistencia o inmunidad hacia los virus durante algún tiempo después de la exposición. Que las infecciones leves o subclínicas confieran inmunidad representa tal vez el factor más importante a la hora de mantener un equilibrio tolerable entre el hombre y las enfermedades víricas frecuentes. Sin embargo, los virus son seres volubles, propensos a experimentar mutaciones en varias direcciones, y un virus que únicamente provoca una infección leve puede evolucionar y convertirse en otro mucho más letal.

Aunque no exista un acuerdo sobre la naturaleza de la inmunidad hacia los virus, sí podemos presentar una descripción simplificada de la misma, aceptada por la mayoría de los virólogos. Según esta interpretación, cualquier inmunidad hacia los virus está mediada por anticuerpos. Los anticuerpos se pueden definir como proteínas sanguíneas modificadas con capacidad de unirse a un virus concreto o a cualquier otro ser extraño que haya provocado su síntesis en el organismo. Si un número suficiente de moléculas de anticuerpo consigue unirse a una partícula vírica, forman a su alrededor una suerte de envoltura que evita que el virus se adhiera a la célula huésped y se multiplique en el interior de ella. Los anticuerpos aparecen en la sangre unos pocos días después de la infección y alcanzan su nivel máximo al cabo de dos o tres semanas. Tras la recuperación, el organismo sigue produciendo anticuerpos durante mucho tiempo, en cantidades que van disminuyendo lentamente; en algunas enfermedades, como el sarampión y la fiebre amarilla, el cuerpo los sintetiza el resto de la vida.

AP PHOTO (*Burnet*)

El prion en la patología



Por Stanley B. Prusiner (premio Nobel en 1997)



Publicado en marzo de 1995

Hace quince años provoqué una ola de escepticismo cuando propuse que los agentes infecciosos que causan ciertas enfermedades degenerativas del sistema nervioso central en animales y, más raramente, en el hombre podrían ser meras proteínas. Una afirmación de ese tenor caía de plano en la herejía. De acuerdo con el dogma imperante, los agentes de enfermedades transmisibles requerían material genético, compuesto por ácido nucleico (ADN o ARN); era este imprescindible para que la infección se asentara en el huésped. Los propios virus, ínfimos entre los agentes infecciosos, precisan ese material para dirigir la síntesis de las proteínas que necesita su replicación. Más tarde, se pondría en cuestión otra conclusión a la que habíamos llegado en mi laboratorio: estas «partículas proteicas infecciosas» —o «priones»— podrían ser el sustrato de enfermedades, hereditarias o contraíbles. Este comportamiento dual era un fenómeno desconocido. Volvimos a encontrar resistencia cuando avanzamos otro paso más y adujimos que los priones se multiplican por una vía increíble: convierten proteínas normales en moléculas peligrosas sin más que modificar su forma. La acumulación de datos experimentales y clínicos nos ha dado la razón.

Las enfermedades de origen priónico son letales. Suelen recibir la denominación común de encefalopatías espongiformes, porque producen en el cerebro abundantes oquedades. Permanecen latentes durante años (decenios en el hombre) y se hallan muy extendidas entre los animales. La forma más común es el *scrapie* o prurito lumbar, que se da en la oveja y en la cabra. La conocida popularmente como «enfermedad de las vacas locas» es la más preocupante. [Entre las enfermedades humanas de origen priónico se incluye la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob, que suele manifestarse como demencia.]

Además de demostrar que una proteína puede multiplicarse y producir la enfermedad sin la ayuda de ácidos nucleicos, hemos ahondado en los mecanismos de la propagación de la PrP [«proteína del prion»] del prurito lumbar en las células. Son muchos los detalles que quedan aún por desentrañar, pero un aspecto parece estar ya bastante claro: la diferencia básica entre la PrP normal y la PrP del prurito lumbar es conformacional. Evidentemente, la proteína del prurito lumbar se propaga al entrar en contacto con moléculas normales de PrP, deshace el plegamiento de estas e insta la transformación de la configuración original en otra propia del prurito lumbar. Este cambio inicia una cascada en la que las moléculas recién transformadas inducen el cambio de forma en otras moléculas normales de PrP, y así sucesivamente.

Los estudios apuntan de modo convincente a que el prion constituye una clase totalmente nueva de patógeno infeccioso y que las enfermedades priónicas se deben a anomalías en la conformación de las proteínas. Todavía queda por demostrar si esas alteraciones dan lugar a enfermedades neurodegenerativas frecuentes, como el alzhéimer, pero esa posibilidad no debería descartarse.

Otros artículos de S. B. Prusiner en IyC

Priones, 12/1984.

Detección de la enfermedad de las vacas locas, 9/2004.

Telómeros, telomerasa y cáncer



Por Carol W. Greider y Elizabeth H. Blackburn (premios Nobel en 2009)



Publicado en abril de 1996

Durante los últimos quince años, la investigación ha permitido identificar una enzima extraordinaria, la telomerasa, que actúa sobre los telómeros [los extremos de los cromosomas] y que se la supone necesaria para el mantenimiento de muchos cánceres humanos. Los cánceres surgen cuando una célula acumula muchas mutaciones genéticas que, en conjunto, provocan que la célula escape de los controles normales sobre la replicación y los movimientos migratorios. Cuando las células y sus descendientes se multiplican sin control, pueden invadir los tejidos vecinos y dañarlos. Algunas pueden también escapar y viajar hasta zonas del organismo que no les corresponde, estableciendo nuevos focos malignos (metástasis) en sitios distantes.

La posibilidad de que la telomerasa ejerza una función importante en el mantenimiento de los cánceres humanos fue ya objeto de debate en 1990. Pero los indicios no han adquirido peso suficiente hasta hace muy poco tiempo. Estos descubrimientos condujeron a un modelo, tan atractivo cuan hipotético, sobre la activación de la telomerasa en humanos, en los estados normal y maligno. Según ese modelo, las células de la línea germinal sintetizan de modo rutinario la telomerasa durante el desarrollo embrionario. Una vez que el cuerpo está totalmente formado, la telomerasa queda bloqueada en muchas células somáticas [no germinales], y los telómeros se van acortando a medida que tales células se reproducen. Cuando el tamaño de los telómeros alcanza cierto umbral, se emite una señal que impide que las células sigan dividiéndose.

Sin embargo, si las mutaciones genéticas que promueven el cáncer obstaculizan la emisión de esas señales de seguridad, o dejan que las células las ignoren, las células continúan dividiéndose, obviando la senescencia. Presumiblemente, continuarán también perdiendo secuencias teloméricas y sufrirán alteraciones cromosómicas que harán que surjan nuevas mutaciones, tal vez carcinogénicas. Cuando los telómeros se han reducido a la mínima expresión, las células mueren. Ahora bien, si como consecuencia de los trastornos genéticos del período de precrisis se vuelve a fabricar telomerasa, las células no perderán completamente sus telómeros, sino que se salvarán y mantendrán su tamaño. De esa manera, las células alteradas genéticamente adquieren las características inmortales del cáncer.

Aunque, en general, los resultados experimentales apoyan esta visión del proceso, de nuevo las cosas puede que no sean como parecen. Algunos tumores avanzados carecen de telomerasa, y ciertas células somáticas, así macrófagos y linfocitos, sintetizan la enzima, como se ha comprobado hace poco. Mas, en conjunto, los indicios sugieren que muchas células cancerosas necesitan la telomerasa para dividirse indefinidamente. La presencia de telomerasa en diversos tipos de cánceres humanos y su ausencia en muchas células normales significa que la enzima puede ser un buen blanco de fármacos anticancerosos. Los agentes capaces de obstaculizar la telomerasa podrían destruir las células tumorales (haciendo que los telómeros desaparezcan) sin alterar el funcionamiento de muchas células normales. La mayoría de las terapias anticancerosas actuales no solo alteran las células malignas, sino también las normales. Suelen ser, pues, bastante tóxicas. Además, como se detecta telomerasa en muchos tipos de cáncer, tales agentes podrían intervenir contra tumores muy dispares.

El mundo animal

Mientras algunos biólogos desarrollaban métodos para comprender el comportamiento celular, otros estudiaban animales vivos e intentaban conocer sus curiosas actividades y sus rituales de apareamiento.

El cortejo de los animales



Por N. Tinbergen (premio Nobel en 1973)



Publicado en noviembre de 1954

En comparación con otros comportamientos de motivación clara, como la nutrición o la huida de los depredadores, las posturas del cortejo en los animales son sumamente enigmáticas. Resulta difícil comprender a primera vista las circunstancias que las suscitan, así como las funciones que desempeñan. Cabe suponer que las exhibiciones y actividades del macho buscan estimular a la hembra para la cooperación sexual, pero incluso esta elemental hipótesis ha de ser demostrada. Y hemos de preguntarnos: ¿por qué ha de ser la hembra estimulada de forma tan elaborada, y qué factores intervienen en la actuación del macho? Nuestro trabajo propone que el cortejo sirve no solo para estimular la conducta sexual en la pareja, sino también para suprimir tendencias antagónicas, esto es, conductas de agresión o de fuga.

Esbocemos sucintamente lo que ocurre cuando las gaviotas cabecinegras buscan pareja, al principio de la estación de cría. Un macho se asienta en un

GODFREY ARGENT STUDIO (*Tinbergen*)

La evolución del comportamiento



Por Konrad Z. Lorenz (premio Nobel en 1973)



Publicado en diciembre de 1958

Los estudiosos del comportamiento animal, siguiendo el ejemplo de los zoólogos, que desde antiguo han sacado partido del método comparativo, comienzan ahora a plantearse una profunda cuestión. Todos conocemos la enorme variabilidad del comportamiento animal, especialmente bajo la influencia de un proceso de aprendizaje. Pero ¿no sería posible que todas las variaciones de conducta individual respondieran a una estructura interna de comportamiento heredado, que caracterizaría a los miembros de una especie, de un género o incluso de un grupo taxonómico superior, de igual modo que el esqueleto de un ancestro primordial determina la forma y estructura de los mamíferos actuales?

En efecto, sí es posible. Expondré un ejemplo que, si bien de apariencia trivial, viene al caso. Quien haya observado a un perro rascarse la quijada o a un ave atusarse las plumas de la cabeza, puede atestiguar que lo hacen de la misma forma. El perro se sostiene sobre el trípode formado por sus ancas y las dos patas delanteras; adelanta una de las patas traseras, que lleva ante el omóplato. Ahora bien, sorprende que casi todas las aves (así como prácticamente todos los mamíferos y reptiles) efectúen para rascarse este preciso movimiento. Para hacerlo, bajan un ala y llevan una pata trasera (esto es, una garra) hacia delante, frente al hombro.

Se podría pensar que al ave le resultaría más sencillo llevar la pata directamente hasta la cabeza, sin mover el ala, manteniéndola replegada sobre su lomo, donde no estorba. No se puede explicar de otro modo una acción tan desmañada, a menos que se admita que es innata. El ave, para rascarse, ha de reconstruir previamente la arcaica relación espacial de las extremidades de su antepasado tetrápodo, del que descienden también los mamíferos.

El estudio comparativo de las pautas motoras innatas constituye una parte importante del programa de investigación del Instituto Max Planck de Etología Comparada. Los sujetos de nuestro estudio son las diversas especies de patos nadadores, que se alimentan en superficie. Esperamos describir la filogenia de su comportamiento a partir de la observación de diminutas variaciones de rasgos conductuales, entre especies, por una parte, e híbridos, por otra.

Primero deseábamos averiguar el modo en que se establecieron los rituales de cortejo de los patos. ¿Qué ocurre cuando los patos se cruzan entre sí? Mediante hibridaciones deliberadas hemos obtenido nuevas combinaciones de pautas motoras, que a menudo conjugan características de ambos progenitores, a veces carecen de las peculiaridades del uno o del otro, y en otras ocasiones exhiben rasgos no manifiestos en ninguno de los dos. Hemos reproducido incluso algunas de las combinaciones de pautas conductuales que se dan en especies distintas de las de los progenitores del híbrido.

Así pues, hemos demostrado que es posible remedar, mediante hibridación, las pautas motoras innatas que distinguen a unas especies de otras. Ello hace pensar que esas conductas dependen de conjuntos relativamente simples de factores genéticos.

Quienes hayan observado a un perro rascándose una mandíbula, o a un ave atusándose las plumas de la cabeza, pueden atestiguar que lo hacen de igual manera

territorio de apareamiento y, ante cualquier gaviota que se le aproxime, reacciona con la emisión de un «canto largo» y la adopción de una postura inclinada. Tal acción, que ahuyenta a los machos, atrae en cambio a las hembras, y antes o después, alguna de ellas se posa en su proximidad. En cuanto lo ha hecho, ambos realizan la «postura hacia adelante». A veces, tal vez hagan un movimiento conocido como «atragantamiento» o «ahogo». Por último, tras pocos segundos, estas aves adoptan de forma casi simultánea la «postura alzada» y sacuden sus cabezas en direcciones opuestas. Ahora bien, la mayoría de estos movimientos se observan también en enfrentamientos claramente hostiles entre machos. También estos pueden emitir el canto largo, exhibir la postura adelantada y realizar las posturas de ahogo y alzada.

Los gestos finales de la secuencia de cortejo —cuando las parejas vuelven la cabeza, separándola del otro en un giro horizontal— difieren de los anteriores. A veces, en las peleas entre dos de las aves se observa ese mismo gesto de cabeza en la gaviota que obviamente lleva las de perder, pero que por alguna razón no puede huir, sea porque está arrinconada o por alguna otra motivación. Este movimiento ejerce un peculiar efecto sobre la agresora: en cuanto la gaviota atacada vuelve la cabeza, apartándola, la otra cesa en su ataque, o lo modera considerablemente. Se trata de un «gesto de paz», como si la víctima estuviera «presentando la otra mejilla». Nos vemos llevados a concluir que esas gaviotas comienzan su cortejo amenazándose y acaban apaciguándose mutuamente con un gesto tranquilizador.

La gaviota cabecinegra no constituye un caso aislado. Hemos visto que nuestra teoría del cortejo es aplicable a muchas otras especies de aves y pájaros (entre ellas, diversos pinzones, cormoranes, alcatraces, patos), así como en animales de grupos totalmente diferentes, como los peces.

Está por elucidar el problema de si este cambio gradual en la situación motivadora está mediada por cambios endocrinos, como el crecimiento de gónadas. La cuestión habrá de resolverse en investigaciones futuras. Nuestra teoría, tan sucintamente esbozada aquí, no es sino un primer paso para desentrañar las complejas relaciones causales que subyacen a los enigmáticos, pero fascinantes, fenómenos del cortejo.

AP PHOTO (*Lorenz*)



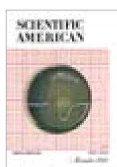
En la mente y en el cerebro

La complejidad del cerebro amedrenta. No obstante, con el tiempo se han ideado estrategias ingeniosas para averiguar su funcionamiento.

El impulso nervioso



Por Bernhardt Katz (premio Nobel en 1970)



Publicado en noviembre de 1952

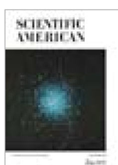
Algunos de los más distinguidos neurofisiólogos han destacado el interés de estudiar y analizar las propiedades de las fibras nerviosas desde la óptica de la ingeniería de comunicaciones. En efecto, la fibra nerviosa puede considerarse una cadena de estaciones repetidoras, sistema que los ingenieros conocen muy bien. Cada punto en la fibra recibe una señal eléctrica procedente del punto anterior, la refuerza para que recupere toda su potencia y la hace avanzar un poco más. Ello equivale a una combinación peculiar de cable eléctrico (de muy deficientes propiedades) y sistema automático de relevos, distribuido a lo largo de la línea de transmisión. Antes de que la señal eléctrica pierda fuerza, esta estimula la fibra, libera recursos energéticos locales y se regenera. La diferencia de potencial eléctrico a uno y otro lado de un punto de la fibra sirve para excitar la región situada por delante, con el resultado de que esa región aporta, a expensas propias, una señal eléctrica muy amplificada, capaz de propagarse hasta la región siguiente y excitarla. La explicación del modo de transmisión de la señal ha sido plenamente confirmada en experimentos.

Cuando una corriente atraviesa la membrana, se produce una descarga parcial en la superficie y se reduce el campo eléctrico, con lo que la membrana se vuelve más permeable al sodio. Comienza un flujo de iones de sodio hacia el interior que mitiga la carga negativa de la parte interna. En consecuencia, el campo eléctrico a través de la membrana se reduce más todavía, la permeabilidad al sodio sigue aumentando y penetra más sodio; se tienen así los elementos de una reacción en cadena que se refuerza por sí misma. El flujo de sodio hacia el interior de la fibra prosigue hasta que este adquiere una carga positiva de tal magnitud que los iones sódicos son ahora repelidos electrostáticamente. Este nuevo equilibrio es precisamente el reverso del potencial de potasio remanente. Podemos ahora comprender el fundamento de la reacción «todo o nada» de las células nerviosas: las neuronas no generan corriente hasta que se acercan al «punto de ignición». Una vez rebasado este, la producción de «corriente sódica» prosigue hacia la saturación y recorre un ciclo propio, que ya no se halla sometido al control del estímulo original.

Neuronas y comportamiento



Por Eric R. Kandel (premio Nobel en 2000)



Publicado en julio de 1970

Los progresos en los conceptos y técnicas de estudio de neuronas individuales y de grupos interconectados de tales células han empujado a los neurocientíficos a aplicar dichos métodos al estudio de manifestaciones completas de una conducta, así como de las modificaciones de comportamiento inducidas por aprendizaje. Lo cual ha hecho despertar el interés por ciertos invertebrados, entre ellos, cangrejos, sanguijuelas, diversos insectos y algunos gasterópodos, que ofrecen la gran ventaja de que sus sistemas nerviosos están compuestos por conjuntos menos numerosos de neuronas (tal vez, entre 10.000 y 100.000, frente al billón o más de los animales superiores). En esos animales se está empezando a distinguir, a nivel celular, no solo la información sensorial que ingresa en el sistema nervioso y las acciones motoras que emanan de él, sino también la secuencia completa de fenómenos implícitos en una respuesta conductual.

Se están empezando a distinguir, a nivel celular, los sucesos implícitos en la respuesta conductual

Los datos más indicativos proceden de estudios de habituación y deshabituación en la médula espinal del gato y en el ganglio abdominal de *Aplysia* (una babosa marina gigante, que llega a alcanzar unos 30 centímetros).

La habituación consiste en la atenuación de la conducta refleja provocada por la presentación reiterada de un estímulo que era, al principio, novedoso. Una vez que el estímulo se ha tornado habitual, dos procesos permiten restaurar la respuesta refleja inicial. Uno es la recuperación espontánea, que resulta de la supresión del estímulo al que el animal se ha habituado. El otro es la deshabituación, que se produce por cambios en la pauta de estimulación; por ejemplo, por la presentación de un estímulo más vigoroso en otra vía nerviosa.

Aplysia exhibe una respuesta de retracción defensiva [ante una leve estimulación]. La branquia, el órgano respiratorio externo de este gasterópodo marino, se halla parcialmente cubierta por el manto, que contiene la delgada concha residual. Cuando se roza ligeramente esa región del manto o el sifón anal (continuación carnosa del manto), el sifón se contrae y la branquia se retrae a una cavidad ubicada bajo el manto.

Podemos ahora proponer un esquema simplificado del circuito para ilustrar la localización y el mecanismo de los diversos cambios plásticos que acompañan a la habituación y deshabituación del reflejo de retracción branquial. La reiterada estimulación de receptores sensoriales lleva a una habituación mediante la producción de un cambio plástico en la sinapsis que media entre la neurona sensorial y la motora. La estimulación de la cabeza lleva a la deshabituación, por facilitación heterosináptica en la misma sinapsis.

Cabe pensar que se podrían aplicar ahora metodologías celulares a procesos de aprendizaje más complejos, orientadas a elucidar el diagrama de conexiones correspondiente a respuestas en la conducta.

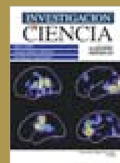
Otros artículos de E. R. Kandel en IyC
Microsistemas de neuronas, 11/1979.
Bases biológicas del aprendizaje y de la individualidad, 11/1992.

JET BUDELMAN *Redux Pictures* (*Kandel*); GETTY IMAGES (*Crick*)

El problema de la consciencia



Por F.H.C. Crick (premio Nobel en 1962) y Christof Koch



Publicado en noviembre de 1992

Hay psicólogos que opinan que, para que sea satisfactoria, una teoría sobre la consciencia habrá de explicar el mayor número posible de aspectos de la misma. Nos parece más prudente comenzar por el aspecto de la consciencia que es probable que nos ceda más fácilmente su secreto. Hemos elegido el sistema visual de los mamíferos. En nuestra opinión, cuando vemos algo claramente, ha de haber neuronas que, disparándose con gran intensidad, representan lo que vemos.

¿Cómo podemos descubrir las neuronas cuya descarga simboliza un determinado percepto? El grupo de William T. Newsome, de la Universidad Stanford, ha acometido una serie de brillantes experimentos sobre neuronas del área cortical MT del cerebro del macaco. Estudiando una neurona del área MT, podríamos hallar que responde óptimamente a rasgos visuales muy específicos, relacionados con el movimiento. Una neurona, por ejemplo, podría emitir una descarga vigorosa en respuesta al movimiento de una barra en un lugar determinado del campo visual, pero solo cuando ese proyecto está orientado en cierto ángulo, moviéndose en una de las dos direcciones perpendiculares a su longitud dentro de cierto intervalo de velocidades.

Sin embargo, tales experimentos no prueban, de forma tajante, que el disparar de esas neuronas sea el exacto correlato neural del percepto. El correlato podría ser solo un subconjunto de las neuronas activadas. O quizás el auténtico correlato sea la descarga de neuronas que, en otro escalón de la jerarquía visual, estén condicionadas fuertemente por las neuronas activadas en el área MT.

La siguiente cuestión clave sería, pues, cómo forma el cerebro sus representaciones generales o de conjunto a partir de las señales visuales. De resultar la atención indispensable para la consciencia visual, el cerebro podría formar las representaciones fijándose solo en un objeto por vez, y pasando rápidamente de un objeto al siguiente. En este orden, las neuronas que representan todos los aspectos del objeto atendido podrían descargar todas juntas con mucha rapidez en un intervalo cortísimo, quizás en rápidas ráfagas.

Esta descarga, rauda y simultánea, podría no solo excitar las neuronas que simbolizaban las implicaciones de ese objeto, sino también reforzar transitoriamente las sinapsis concernidas, de suerte que esta pauta particular de descarga pudiese recordarse enseguida: una modalidad de la memoria a corto plazo.

Otros artículos de F.H.C. Crick en IyC
Reflexiones en torno al cerebro, 11/1979.

BIOLOGÍA CELULAR

El caos ordenado de las proteínas

En contra de lo aceptado, las proteínas no necesitarían adoptar formas rígidas para llevar a cabo sus funciones en la célula

A. Keith Dunker y Richard W. Kriwacki

EN SÍNTESIS

Según el conocimiento tradicional, las proteínas deben adoptar una configuración rígida para desempeñar tareas tales como la unión a determinadas moléculas diana. Pero trabajos recientes indican que una tercera parte de las proteínas humanas se hallan total o parcialmente desestructuradas.

Aunque durante mucho tiempo la falta de plegamiento se consideraba una patología, se sabe ahora que ese rasgo no impide necesariamente la operatividad de la proteína. De hecho, a menudo resulta crucial para su funcionamiento.

Las proteínas desestructuradas pueden haber desempeñado un papel importante durante la evolución. Un mejor conocimiento de su naturaleza contribuiría al diseño de nuevos fármacos.

Las proteínas son la materia de la vida. Representan los ojos, los brazos y las piernas de las células vivas. Incluso el ADN, el icono supremo de todas las moléculas biológicas, resulta importante sobre todo porque contiene los genes que especifican la síntesis de proteínas. Y las células de nuestro organismo —como las neuronas, los leucocitos o las células olfatorias— se diferencian unas de otras en gran medida porque activan distintos conjuntos de genes y, en consecuencia, producen diferentes grupos de proteínas.

Dada la importancia de esas moléculas, muchos podrían pensar que los aspectos básicos de su morfología y funcionamiento se conocen desde hace tiempo. Sin embargo, durante decenios los científicos aceptaron una idea que resultó incompleta. Dedujeron, acertadamente, que las proteínas se hallaban compuestas por aminoácidos unidos entre sí como las cuentas de un collar. Además, para que una proteína ejerciera su función, su cadena de aminoácidos debía primero plegarse y adoptar una configuración precisa y rígida. No obstante, hoy se hace cada vez más evidente que ciertas proteínas desempeñan sus funciones biológicas sin haber llegado nunca a plegarse por completo, mientras que otras se pliegan solo cuando se las necesita. De hecho, quizás una tercera parte de las proteínas humanas son «intrínsicamente desordenadas» y poseen al menos algunas regiones desplegadas o desordenadas.

Desde hace tiempo se sabía que las polimerasas (enzimas que copian el ADN o lo transcriben a ARN) representan complicadas nanomáquinas constituidas por

A. Keith Dunker es biofísico de la facultad de medicina de la Universidad de Indiana, donde dirige el Centro de Biología Computacional y Bioinformática. Investigó los virus durante treinta años antes de adentrarse en el estudio de las proteínas desestructuradas en 1995.



Richard W. Kriwacki es biólogo estructural en el Hospital de Investigación Pediátrica St. Jude de Menfis. En 1996, cuando trabajaba en el Instituto Scripps de Investigación en La Jolla, California, descubrió, junto con otros, uno de los primeros ejemplos de proteínas desordenadas.



La proteína flexible p27 (*verde*), al plegarse en múltiples formas, puede enrollarse en torno a distintas moléculas asociadas, algo que las proteínas con una estructura tridimensional única no pueden hacer.

numerosas partes móviles; gracias a una suerte de bisagras, los distintos segmentos proteicos pivotan unos en torno a otros. Pero a menudo uno se imagina esas moléculas como combinaciones de piezas rígidas, de modo similar a las secciones de una silla plegable. Las proteínas intrínsicamente desordenadas se parecen más bien a unos espaguetis revueltos en un puchero de agua hirviendo.

Hace quince años esa afirmación se hubiese considerado una herejía. Hoy en día, se reconoce que ese carácter amorfo y flexible probablemente contribuyó al origen de la vida sobre la Tierra y que la flexibilidad sigue desempeñando un papel crucial en las células, en concreto, durante la división celular y la activación génica. Esta reciente perspectiva proporciona conocimientos nuevos y asombrosos sobre la biología básica de las células y apunta hacia formas novedosas de tratar las enfermedades, entre ellas el cáncer.

ENCAJES PERFECTOS

La idea de que una estructura tridimensional rígida determinaba la función de una proteína se planteó en 1894. Emil Fischer, químico de la Universidad de Berlín, propuso que las enzimas (los catalizadores de las reacciones bioquímicas) interaccionaban con otras moléculas al unirse a contornos específicos de su superficie externa; en cambio, las enzimas no reconocerían otras moléculas con características superficiales ligeramente distintas. En otras palabras, una enzima y la molécula a la que se une encajan entre sí como una llave y una cerradura.

En la época en que Fischer formuló su modelo se desconocía la naturaleza de las proteínas. Durante los 60 años siguientes, se descubrió que las proteínas estaban formadas por cadenas de aminoácidos y se concluyó que, para funcionar correctamente, debían plegarse y adoptar una forma precisa. En 1931, el bioquímico Hsien Wu proporcionó un sólido respaldo a esa idea al demostrar que la desnaturalización de las proteínas (la eliminación de su estructura tridimensional natural) daba lugar a una pérdida total de su función. Tras determinar la estructura tridimensional de la mioglobina de cachalote en 1958, se ha analizado la arquitectura de más de 50.000 tipos de proteínas. Para tal fin, primero se provoca la transformación de las estructuras rígidas en cristales; posteriormente, estos se irradian con rayos X y se estudia su difracción.

Pero ese mundo estructurado de las proteínas, basado en el modelo de llave y cerradura, no resultaba en realidad tan estático. A principios del siglo xx ya se sabía que muchos anticuerpos se unían a diversas moléculas diana, o antígenos, una observación que contradecía el modelo de llave y cerradura. En los años cuarenta, el célebre químico Linus Pauling sugirió que ciertos anticuerpos podían plegarse de distintos modos y que las diversas configuraciones adoptadas dependían del ajuste entre anticuerpo y antígeno.

A partir de los años cuarenta, otras observaciones indicaron que no todas las proteínas se atenían al dogma según el cual la función era consecuencia de una estructura tridimensional rígida. Pero, por lo general, aquellas que no lo hacían se consideraban un caso aislado, insólitas excepciones a la norma. Uno de los autores (Dunker) describió varios de esos ejemplos y se dio cuenta de que tal vez debía reexaminarse el dogma. En 1953, se descubrió que la caseína (la proteína de la leche) se hallaba desestructurada en su mayor parte; esa flexibilidad probablemente facilitaba su digestión en los mamíferos lactantes. A principios de los setenta, se observó que la proteína fibrinógeno contenía una región de gran tamaño sin una estructura fija; esa región, junto con otras de menor tamaño descubiertas posteriormente, desempeñaba un papel crucial en la coagulación de la sangre. Más tarde, en ese mismo decenio, la proteína de la envoltura externa, o cápside, del virus del mosaico del tabaco ofrecía otro ejemplo revelador. Cuando la cápside se halla vacía, la proteína presenta grandes regiones desestructuradas que cuelgan en la cavidad; esa laxitud permite que el ARN recién sintetizado, formado durante la reproducción vírica en una célula infectada, se empaquete en su interior. Pero a medida que el ARN va entrando, la proteína se une a él y adopta una estructura rígida.

Mientras tanto, la imposibilidad de inducir experimentalmente el plegamiento de determinadas proteínas hacía suponer que se cometía algún error: seguramente las cadenas de aminoácidos solo podrían adoptar una forma plegada «correcta» en el ambiente interno de la célula. Así, cuando los investigadores colocaban disoluciones de proteínas purificadas en viales para examinarlas con un espectrómetro de resonancia magnética nuclear (RMN) —una de las técnicas más utilizadas para estudiar proteínas— obtenían a veces datos borrosos, algo que interpretaban como un fallo en el plegamiento de las moléculas.

Pero esos resultados encerraban una información mucho más interesante. La espectroscopia de RMN exige la aplicación de potentes pulsos de radiofrecuencia para inducir el giro sincronizado de los núcleos atómicos de determinados elementos, como el hidrógeno. Los ligeros cambios de frecuencia en la respuesta de los núcleos guardan una estrecha relación con la posición de los átomos en el interior de los aminoácidos y con la ubicación de un aminoácido respecto a otro. Así, a partir de los cambios de frecuencia se suele establecer la estructura de una proteína rígida. Pero si los aminoácidos se mueven mucho —como sucedería en una proteína desestructurada— los cambios de frecuencia se vuelven borrosos.

En 1996, uno de los autores (Kriwacki, a la sazón en el Instituto Scripps de Investigación) examinaba la proteína p21, implicada en el control de la división celular, cuando se dio cuenta de un hecho sorprendente. Según los datos de RMN, la proteína presentaba una desorganización casi total. Los aminoácidos rotaban libremente en torno a los enlaces químicos que los mantenían unidos, nunca permanecían en una conformación determinada durante más de una fracción de segundo. Y sin embargo —y este fue el aspecto que le chocó—, p21 seguía ejerciendo su indispensable función reguladora. Constituía la primera prueba convincente de que la falta de estructura en una proteína no inutiliza su función.

La espectroscopía de RMN sigue representando la principal técnica para determinar si una proteína se halla plegada o desordenada. Gracias a ella, junto con otros métodos, se ha confirmado que numerosas proteínas son intrínsecamente desordenadas. Esas moléculas cambian constantemente de forma como consecuencia del movimiento browniano y de sus propias fluctuaciones térmicas y, sin embargo, son perfectamente funcionales.

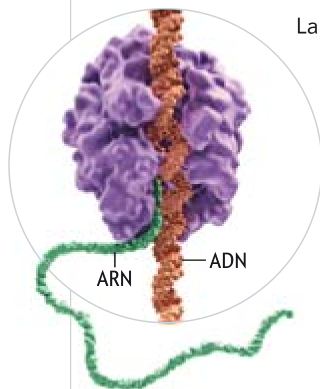
MARAÑA PROTEICA

Esta visión nueva y más amplia queda muy bien reflejada en la proteína p27, presente en la mayoría de los vertebrados. Al igual que p21, p27 es una de las proteínas fundamentales que regulan la división celular para que las células no se multipliquen de manera descontrolada. La RMN muestra que p27 es muy flexible, con regiones que se pliegan y despliegan rápida-

PÁGINAS ANTERIORES: AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

Orden frente a desorden

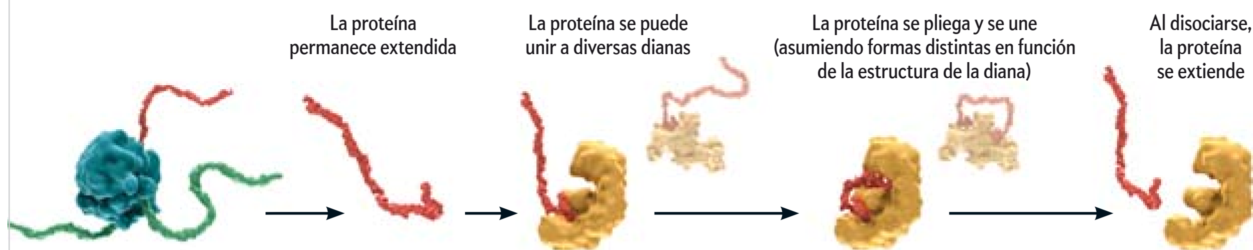
La maquinaria molecular de las células transcribe la información codificada en las secuencias de ADN (los genes) en moléculas de ARN y traduce el ARN en las largas cadenas de aminoácidos que componen las proteínas. Los libros de texto de biología afirman que, a continuación, una proteína debe plegarse y adoptar una forma peculiar (*secuencia superior*) para desempeñar su función; por ejemplo, para unirse a una molécula específica del mismo modo en que una llave encaja en una cerradura. Sin embargo, muchas proteínas permanecen desplegadas, al menos en parte. Esta flexibilidad las capacita para unirse a distintas moléculas (*secuencia inferior*) o para realizar otras funciones.



Visión clásica de la actividad proteica



Proceso descubierto recientemente



mente para dar lugar a estructuras lábiles con forma de sacacorchos o de lámina. En la mayoría de las células cancerosas humanas la cantidad de p27 se reduce, y cuanto menor sea el valor, peor resulta el pronóstico para el paciente.

La molécula p27 frena la división celular al unirse al menos con seis tipos de enzimas quinasas e inhibir su actividad. Las quinasas son las principales reguladoras de la replicación del ADN y de la división celular. Añaden grupos fosfato (PO_4^{3-}) a otras proteínas (las «fosforila»), una reacción que pone en marcha una cascada de sucesos. Para llevar a cabo su tarea, la dinámica molécula p27, con forma de cordón, se enrolla alrededor de una quinasa —que posee una estructura básicamente rígida— y recubre una parte importante de su superficie, entre ellos los lugares químicamente reactivos, o «centros activos». Ese bloqueo impide la fosforilación y, por tanto, detiene la división celular. Gracias a su flexibilidad, p27 puede amoldarse a distintos tipos de enzimas, enrollándose en torno a ellas e inhibiéndolas. Cuando una proteína posee esta característica se dice que es promiscua o que está pluriempleada.

En una escala que abarcara desde un estado de máximo desorden (sin ninguna estructura) hasta otro de máximo orden (plegamiento rígido), la proteína p27 se situaría cerca del primer extremo, y las quinasas, del extremo opuesto. Muchas otras proteínas ocupan alguna posición intermedia, ya que poseen unas regiones estructuradas y otras desestructuradas. La calcineurina, que interviene en la respuesta inmunitaria (por lo que constituye la diana de los fármacos antirrechazo), actúa al revés que una quinasa. Posee una región organizada, el centro activo de la enzima, que funciona según el modelo clásico de llave y cerradura para retirar los grupos fosfato de otras proteínas que han sido fosforiladas. Pero también cuenta con una región desordenada que se une al centro activo de la propia enzima y lo anula cuando no hay necesidad de retirar grupos fosfato. Por tanto, la calcineurina puede considerarse como dos proteínas en una: la región estructurada lleva a cabo la catálisis y la región desestructurada regula esa función catalítica.

Los ejemplos mencionados hasta aquí hacen referencia a proteínas que se pliegan —bien sobre sí mismas o en torno a otras— para realizar su función. Pero a menudo el desorden forma parte del mecanismo operativo de una proteína. En un caso conocido, la longitud de una región desestructurada actúa a modo de mecanismo temporizador, al controlar la velocidad a la que dos lugares de unión se acercan entre sí: cuando la región desorganizada es más larga, los dos puntos de unión emplean más tiempo en reconocerse que cuando esa región es más corta. En otro caso, la desestructuración permite a la proteína colarse a través de una estrecha abertura y atravesar la membrana celular. Y también existen proteínas desordenadas en los axones de las neuronas, donde forman estructuras con forma de cepillo que evitan el colapso de los axones.

Al contrario de lo que podíamos esperar, algunas proteínas permanecen desestructuradas incluso después de unirse. En el Hospital para Niños Enfermos de Toronto, Tanja Mittag (que trabaja en la misma facultad que Kriwacki), descubrió

Proteínas escurridizas

Ante la imposibilidad de conocer su estructura por los medios usuales, debe recurrirse al refinado de modelos estadísticos

SANTI ESTEBAN MARTÍN, CARLOS W. BERTONCINI Y XAVIER SALVATELLA

Existen solo veinte aminoácidos naturales para la biosíntesis de proteínas de acuerdo con las instrucciones codificadas en el genoma. Siendo tan simples en su composición química, ¿cómo es posible que estas macromoléculas puedan ejecutar funciones de suma diversidad y complejidad? Ello se debe a que la actividad biológica de cada proteína no depende tanto de la naturaleza de los aminoácidos que la componen como del modo en que se combinan y, por tanto, de la estructura tridimensional que esta adopta al plegarse —para una proteína mediana, de unos 200 aminoácidos, el número de combinaciones posibles para los veinte aminoácidos disponibles asciende a 20^{200}.

La estrecha relación entre la estructura y la función en las proteínas ha originado programas de investigación que tienen por objeto la determinación sistemática de la estructura de todas las proteínas del genoma. Estos estudios han revelado, sorprendentemente, que existe un número elevado de proteínas que, aunque no adoptan estructuras tridimensionales definidas, llevan a cabo importantes funciones biológicas. Esta nueva clase de proteínas, que desafían en parte el dogma central de la biología molecular formulado por Francis Crick en 1958 (a cada secuencia aminoacídica le corresponde una estructura tridimensional), recibe el nombre de proteínas intrínsecamente desordenadas (IDP, por sus siglas en inglés).

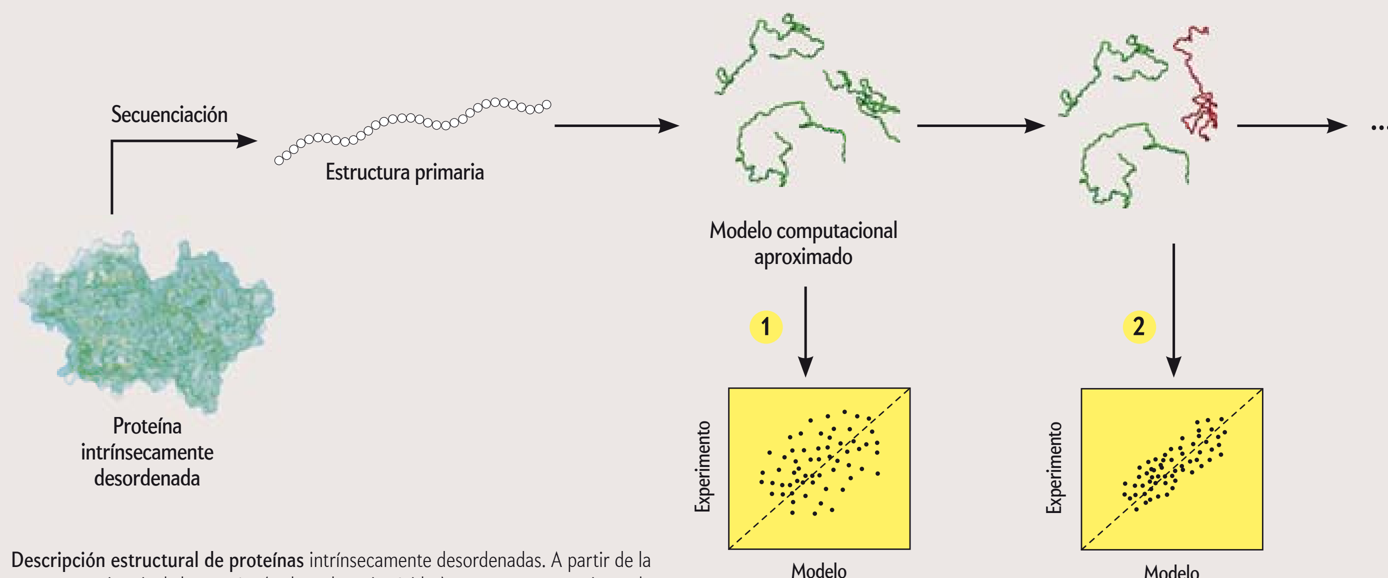
Las IDP no pueden ser descritas por una sola conformación, puesto que adoptan múltiples estructuras. Deben representarse como un conjunto de estas —algunas compactas, otras extendidas— de estabilidad similar y que se intercambian a una gran velocidad: más de un millón de veces por segundo.

Dado que estas macromoléculas desempeñan funciones importantes y se hallan implicadas en enfermedades neurodegenerativas (alzhéimer y párkinson), reviste suma importancia conocer sus propiedades estructurales. Existe por ello un gran interés en averiguar si presentan patrones estructurales de baja estabilidad, es decir, plegamientos adoptados por una pequeña fracción de las estructuras que colectivamente las describen y que, por lo tanto, no se pueden estudiar con las técnicas de determinación estructural usuales. Caracterizar a resolución atómica cada una de estas estructuras constituye uno de los principales retos de la biología estructural moderna. Debido a su complejidad, esta cuestión solo puede abordarse desde una aproximación interdisciplinaria, que combine el uso de mediciones experimentales con modelos teóricos basados en el análisis de estructuras de proteínas depositadas en bases de datos.

Un paso importante en esa dirección fue descubrir que las preferencias estructurales de cada uno de los veinte aminoácidos naturales en proteínas desordenadas son en gran medida independientes del contexto (la secuencia); asimismo, guardan una estrecha semejanza con las preferencias observadas en las regiones flexibles de proteínas ordenadas, tales como los bucles que conectan elementos de estructura secundaria.

Modelos refinados

Ese condicionante (preferencias estructurales) permite generar modelos para proteínas desordenadas que, pese a contener notables aproximaciones, presentan un elevado grado de acuerdo con las mediciones experimentales de resonancia magnética nuclear (RMN) y de dispersión de rayos X a ángulo pequeño. Sin embargo, estos modelos preliminares, aproximados, carecen de la resolución necesaria para estudiar la presencia de patrones de baja estabilidad, posiblemente



Descripción estructural de proteínas intrínsecamente desordenadas. A partir de la estructura primaria de la proteína (cadena de aminoácidos), se propone un conjunto de estructuras tridimensionales basadas en las preferencias que presenta cada uno de los 20 aminoácidos naturales en las regiones flexibles de proteínas conocidas. Se obtiene así un primer modelo teórico aproximado (*hebras verdes*). Para refinar esta descripción de la proteína, se recurre a parámetros estructurales obtenidos mediante resonancia magnética nuclear (RMN). El método se basa en comparar los valores experimentales de esos parámetros con los valores teóricos (calculados a partir del modelo) correspondientes (*1*). Según el grado de coincidencia, se modifica el modelo inicial. Se obtiene entonces un segundo modelo, mejorado (*hebra granate*) y se procede a una segunda comparación

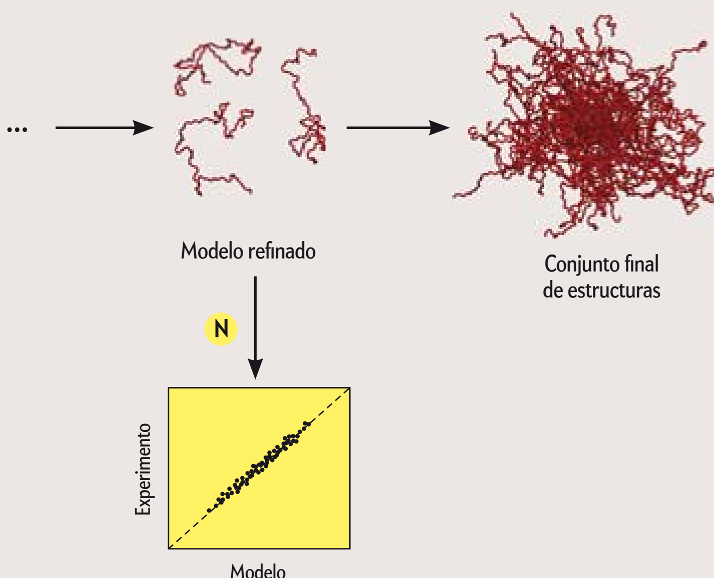
implicados en la función de las IDP. Es necesario, pues, mejorar los modelos actuales a través de técnicas de refinado estructural.

La RMN es una técnica particularmente adecuada para el refinado estructural, dado que algunos de los parámetros experimentales accesibles, como los acoplamientos dipolares residuales (RDC, por sus siglas en inglés), dependen tanto de la estructura local y secundaria como de la topología de la proteína. Los métodos de refinado corrigen la posición de los átomos de cada una de las estructuras hasta que estas reproducen, en conjunto, los datos de RMN obtenidos experimentalmente.

En nuestro laboratorio hemos desarrollado una herramienta que permite mejorar la precisión de modelos aproximados para el estudio de IDP. A partir de valores de RDC obtenidos mediante RMN, hemos determinado un modelo estructural de la proteína ubiquitina en su estado desordenado. El conjunto refinado obtenido reproduce, además de los datos de RDC, otros parámetros de RMN medidos de forma independiente, lo que valida el cálculo estructural llevado a cabo. La característica más importante de este conjunto es, sin embargo, que reproduce los patrones estructurales de baja estabilidad de la molécula en estudio.

Los resultados, que se publicaron en marzo de 2010 en el *Journal of the American Chemical Society*, indican que el refinado de modelos estadísticos a partir de datos de RMN, como los acoplamientos dipolares residuales, abre las puertas a la caracterización de las propiedades estructurales de IDP a alta resolución. Ello permitirá ahondar en el conocimiento del origen de la actividad biológica de esta misteriosa clase de proteínas así como en su implicación en enfermedades neurodegenerativas con importante impacto personal y social.

Santi Esteban Martín, Carlos W. Bertoncini y Xavier Salvatella
Laboratorio de biofísica molecular
Instituto de Investigaciones Biomédicas de Barcelona



con los datos experimentales de referencia (*2*). Y así sucesivamente hasta que los valores teóricos coinciden con los experimentales (*N*). El modelo refinado, de gran precisión, que se obtiene al final del proceso resulta de gran utilidad para estudiar las propiedades estructurales de la proteína.

hace poco la proteína inhibidora Sic1 en la levadura. La molécula se mantiene unida a su compañera a través de varios segmentos cortos que se juntan y separan continuamente en un único punto, mientras que el resto de Sic1 permanece desestructurado.

El desorden también se da en las proteínas de organismos más sencillos, e incluso en virus. Los fagos, virus especializados en infectar bacterias, se adhieren a la membrana de una célula huésped mediante proteínas que se mantienen unidas al cuerpo principal del fago por medio de conectores flexibles. A continuación, la proteína de adhesión, de menor tamaño y mayor movilidad que el fago entero, puede reorientarse con rapidez y optimizar su alineamiento durante el acoplamiento.

PROMISCUIDAD GENERALIZADA

Hasta la fecha, se han identificado unas 600 proteínas total o parcialmente desestructuradas y se ha descrito su función en laboratorios de todo el mundo. Pero sospechamos que existen muchas más. Después de todo, hasta hoy tan solo se ha descifrado la estructura de una pequeña parte de las 100.000 proteínas que se estima que hay en el cuerpo humano. Además, recientes estudios «bioinformáticos» llevados a cabo por Dunker y sus colaboradores apuntan en esa dirección.

El enfoque bioinformático se basa en los primeros estudios teóricos de proteínas individuales. Estos sugerían que, después de que una célula sintetiza una cadena de aminoácidos para fabricar una proteína, la cadena se pliega de una manera que depende de su composición. En concreto, los aminoácidos voluminosos e hidrofóbicos (los que repelen las moléculas de agua que, de forma natural, rodean a las proteínas) tienden a situarse en la parte interior de la molécula. Por el contrario, los aminoácidos que acaban localizándose sobre la superficie de una proteína plegada suelen ser pequeños e hidrofílicos (tienden a interaccionar con las moléculas de agua circundantes).

La idea de Dunker consistía en comparar las secuencias de aminoácidos de proteínas que se sabía eran intrínsecamente desordenadas con las que presentaban formas plegadas rígidas. Mediante el empleo de algoritmos de computación, su equipo descubrió en 1997 que las proteínas intrínsecamente desordenadas presentaban más aminoácidos hidrofílicos que las proteínas rígidas. Por tanto, el balance entre aminoácidos hidrofílicos e hidrofóbicos permitiría pronosticar el grado de plegamiento o desorganización de una proteína concreta.

Para explorar las implicaciones biológicas de sus hallazgos preliminares, el equipo de Dunker realizó en el año 2000 una comparación entre los diversos reinos de la vida. Se examinaron los genomas de varios organismos mediante algoritmos que buscaban segmentos de ADN que codificaban largas cadenas de aminoácidos hidrofílicos. Las proteínas correspondientes resultarían las más idóneas para presentar, al menos, cierto grado de desorganización. En los organismos más sencillos, las bacterias y las arqueobacterias, se previó que muy pocas proteínas exhibirían un desorden intrínseco. Pero en eucariotas (organismos más complejos con células nucleadas, como levaduras, moscas de la fruta y seres humanos) las proteínas desestructuradas serían mucho más frecuentes.

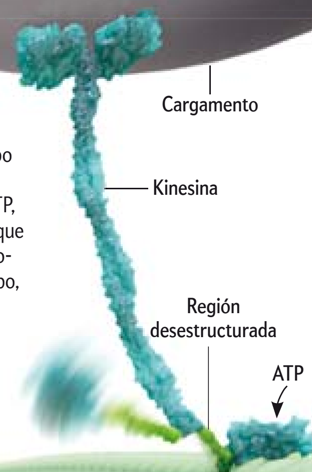
Esos resultados fueron ampliados en 2004 por un equipo liderado por David T. Jones, de la Universidad de Londres, que realizó comparaciones con datos relativos a seres humanos. De modo sorprendente, se descubrió que hasta el 35 por ciento de todas las proteínas humanas contendrían amplias regio-

Flexibilidad operativa

En sus diversas funciones como enzimas, componentes estructurales o máquinas moleculares, las proteínas dirigen casi todas las actividades celulares. Se ilustran tres ejemplos, en una célula humana, en que la ausencia de una estructura predeterminada en la proteína resulta crucial para el funcionamiento de la misma.

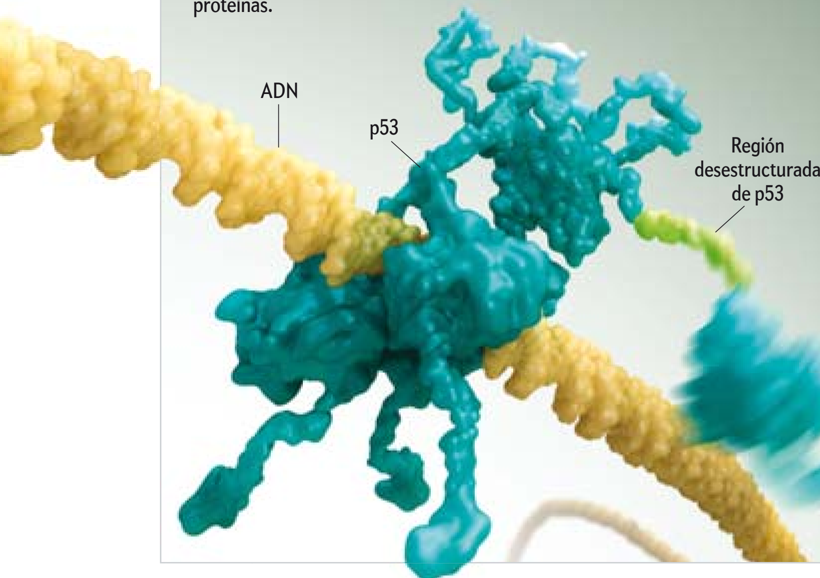
Transportador monorraíl

Una máquina molecular formada por dos copias de la proteína kinesina «camina» a lo largo de los microtúbulos para arrastrar una vesícula u otro tipo de cargamento de una parte a otra de la célula. Cada paso está impulsado por una molécula de ATP, que reacciona con el «pie» adelantado y obliga a que una región «conectora» desestructurada de la proteína se pliegue en torno a ese pie. Al mismo tiempo, el conector también empuja al pie posterior, obligándolo a girar hacia delante, donde se vuelve a unir al microtúbulo.



Protector contra el cáncer

Cuando una célula resulta dañada por la radiación o por otros motivos, la proteína p53 entra en acción. Una agrupación de cuatro copias de p53 se adhiere a lugares específicos del ADN para poner en marcha la producción de enzimas reparadoras del ADN. Las regiones desestructuradas de p53 permiten al complejo proteico enrollarse en torno a la doble hélice. Aparte del ADN, la proteína puede interaccionar con el ARN y con más de 100 tipos de proteínas.



Controlador de acceso al núcleo

Incrustado en la membrana nuclear, el complejo del poro nuclear está formado por unos 30 tipos de proteínas ensambladas con una perfecta simetría octogonal y regula las moléculas que entran y salen. La abertura está rellena de un «gel» de proteínas totalmente desplegadas. Las moléculas pequeñas como el agua atraviesan el gel sin ningún impedimento, mientras que las moléculas grandes necesitan de un medio de transporte activo.

FUENTE: «THE TUMOR SUPPRESSOR P53: FROM STRUCTURES TO DRUG DISCOVERY», POR ANDREAS C. JOERGER Y ALAN R. FERSHT EN *COLD SPRING HARBOR PERSPECTIVES IN BIOLOGY*, VOL. 3, N.º 2; FEBRERO DE 2011

nes desestructuradas. Es decir, en un tercio de nuestras proteínas el concepto de llave y cerradura resultaría, sencillamente, irrelevante.

Las razones de esta discrepancia todavía no se han aclarado. Una posible explicación sería que las proteínas con características estructurales del tipo llave-cerradura demostrarían la máxima eficacia en funciones como la actividad enzimática, mientras que las proteínas intrínsecamente desordenadas lo harían en la señalización y la regulación. Las bacterias sencillas reúnen todos sus elementos constituyentes en un único espacio. Los organismos complejos, en cambio, poseen numerosos compartimentos intracelulares como el núcleo, el aparato de Golgi, las mitocondrias, etcétera; por tanto, necesitan una mayor señalización entre sus componentes y una regulación más extensa. Los organismos pluricelulares requieren además esquemas de señalización para coordinar la actividad de los di-

versos tipos de células y tejidos. En el ejemplo de la proteína p27 comentado anteriormente, la flexibilidad de la molécula le permite transmitir mensajes químicos a lo largo de las rutas de señalización de una célula: la información se halla en su configuración, en sus modificaciones químicas (como la fosforilación) y en el tipo de unión que establece con otras moléculas, a las que inhibe o regula.

EL SECRETO DE LA EVOLUCIÓN

La escasez de proteínas intrínsecamente desordenadas en las bacterias indicaría que ese tipo de moléculas habría surgido tarde en la evolución. Sin embargo, diversas líneas de investigación sugieren lo contrario. Por un lado, numerosos sistemas de señalización importantes en bacterias utilizan proteínas desestructuradas, y no proteínas estructuradas. Además, en las máquinas moleculares evolutivamente antiguas, formadas por asociaciones de ARN y proteínas, casi todas las proteínas se hallan total o parcialmente desestructuradas cuando no están unidas a su ARN correspondiente. Entre estos complejos híbridos cabe citar los somites cirujanos (*spliceosome*, una máquina molecular que mediante diversos cortes y empalmes edita, o procesa, el ARN en una de las etapas intermedias de la síntesis proteica) y el ribosoma (el complejo que enlaza los aminoácidos entre sí para formar proteínas).

Las investigaciones sobre el origen de la vida también indican la antigüedad de las proteínas desestructuradas. Una de las principales hipótesis sostiene que la vida de los primeros organismos se basaba en el ARN. La molécula ejercía a la vez una función catalítica y de almacenamiento de información genética, tareas que en las células modernas desempeñan las proteínas y el ADN, respectivamente. Un problema importante relacionado con esta teoría es que el ARN se pliega de manera muy poco eficiente para adoptar su forma catalítica y a menudo se queda atascado en conformaciones inactivas. En las células actuales, las proteínas chaperonas del ARN ayudan al ácido nucleico a plegarse correctamente. Otras proteínas estabilizan un ARN determinado en su configuración activa, lo que sugiere que la aparición de esas moléculas habría resuelto la dificultad de plegamiento del ARN. Tanto las chaperonas como las proteínas estabilizantes carecen de estructura antes de unirse al ARN.

Otro dato que respalda la antigüedad de las proteínas desordenadas procede del análisis del origen del código genético, el conjunto de reglas que utilizan las células para traducir la información almacenada en los ácidos nucleicos (ARN o ADN) en una secuencia de aminoácidos. Se piensa que determinados aminoácidos fueron codificados en las etapas iniciales de la creación de la vida, mientras que otros lo fueron más tarde. Probablemente, los aminoácidos voluminosos e hidrofóbicos que dirigen el plegamiento de una proteína aparecieron tarde, de modo que las proteínas sintetizadas a partir de los primeros aminoácidos muy probablemente permanecerían desplegadas cuando se hallaban aisladas. De ser cierta la idea sobre la evolución del código genético, las primeras proteínas que se crearon presentarían un plegamiento precario o carecerían de él. Sin duda, los aminoácidos que surgieron más tarde permitieron que las proteínas adquirieran una estructura; esos aminoácidos sirvieron de base para la formación de centros activos del tipo llave-cerradura en las enzimas y ofrecieron la oportunidad para que, a lo largo de millones de años, las proteínas reemplazaran al ARN como centro neurálgico de la actividad catalítica de la célula.

UN ARMA DE DOBLE FILO

A la vista de la importancia biológica de las proteínas, no debería sorprendernos que muchas de ellas sean responsables de enfermedades. El nuevo paradigma del desorden intrínseco en las proteínas cambiará por completo la forma en que entendemos y tratamos las dolencias humanas.

En algunos casos, la ausencia de estructura en una proteína resultará perjudicial. Si una célula las sintetiza en exceso, ciertas proteínas desorganizadas tenderán a agregarse y a formar placas. En el cerebro, se piensa que estas placas ocasionan una serie de patologías neurodegenerativas devastadoras, entre ellas las enfermedades de Alzheimer, Parkinson y Huntington. Parece que las proteínas desestructuradas deben mantenerse bajo un control escrupuloso para evitar que se vuelvan dañinas. En 2008, un estudio a gran escala realizado en levaduras, ratones y humanos, encabezado por M. Madan Babu, del Laboratorio de Biología Molecular del Medical Research Council en Cambridge, demostró que las células regulan de forma más estricta las proteínas desestructuradas que las que se hallan plegadas.

El descubrimiento de la posible implicación de proteínas intrínsecamente desordenadas en ciertas enfermedades está generando nuevas ideas sobre futuros tratamientos. En casi todos los procesos biológicos se producen interacciones entre proteínas, por lo que durante mucho tiempo han sido objeto de interés en el desarrollo de medicamentos; pero hasta la fecha se han obtenido escasos resultados, si se compara con las estrategias dirigidas contra las interacciones entre enzimas y moléculas más pequeñas. Las proteínas que interaccionan con proteínas desestructuradas a menudo ofrecen a sus compañeras puntos de anclaje que los investigadores podrían aprovechar para introducir nuevos fármacos. En concreto, mediante moléculas que anulan una interacción entre un gen importante para la supresión del cáncer y una de sus parejas reguladoras, se ha conseguido detener el cáncer de animales de laboratorio; en la actualidad, esas moléculas se están ensayando en humanos. El equipo de Kriwacki está desarrollando una línea de ataque parecida para tratar el retinoblastoma, un cáncer del ojo que afecta especialmente a los niños. Los ensayos preliminares en animales han ofrecido resultados prometedores. Otros laboratorios están trabajando en proyectos similares.

Los investigadores interesados en el modo de acción de las proteínas están empezando a dejar de lado el antiguo modelo de la llave-cerradura. Se están dando cuenta de que algunas funciones biológicas están mejor dirigidas por proteínas rígidas, y otras, por proteínas muy dinámicas. El amanecer de una nueva era en la estructura y función de las proteínas tiene el potencial necesario para trasformar nuestros conocimientos sobre la vida, y quizá para salvarla.

PARA SABER MÁS

Structural studies of p21$^{Waf1/Cip1/Sdi1}$ in the free and Cdk2-bound state: Conformational disorder mediates binding diversity. Richard W. Kriwacki et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 93, n.º 21, págs. 11.504-11.509, 15 de octubre de 1996.
Intrinsically unstructured proteins and their functions. H. Jane Dyson y Peter E. Wright en *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, vol. 6, págs. 197-208, marzo de 2005.
Structural disorder throws new light on moonlighting. Peter Tompa et al. en *Trends in Biochemical Sciences*, vol. 30, n.º 9, págs. 484-489, 1 de septiembre de 2005.
Understanding protein non-folding. Vladimir N. Uversky y A. Keith Dunker en *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 1804, págs. 1231-1264, junio de 2010.
Base de datos de proteínas desordenadas: **www.disprot.org**
Base de datos de proteínas estructuradas **www.rcsb.org/pdb**

ARQUEOLOGÍA

La dama de Cao

El descubrimiento de una tumba de la civilización mochica abre un nuevo capítulo en la arqueología precolombina: la mujer que la ocupaba gobernó ese pueblo a comienzos de nuestra era

Régulo Franco Jordán

EN SÍNTESIS

La civilización mochica conoció un desarrollo importante entre los siglos III y VIII en la costa norte de Perú. Entre los vestigios que dejó destacan pirámides de adobe, tumbas y objetos. Fue el primer pueblo que practicó el sacrificio humano.

En la pirámide Cao Viejo, los arqueólogos han descubierto la primera tumba de una reina: la señora de Cao. La conservación de la sepultura y del cuerpo es extraordinaria.

La dama, a quien se le atribuyen poderes de curandera, reinaba sobre el pueblo mochica. Merece la pena, por tanto, revisar la función de la mujer en las culturas precolombinas.

En la costa norte de Perú y a comienzos de nuestra era se desarrolló la civilización mochica, antes que la chimú y la inca, esta última más ampliamente conocida. En cinco siglos (del III al VIII), el pueblo mochica conquistó un territorio de varios centenares de kilómetros, donde se encuentran las *huacas*, pirámides fabricadas en adobe de tierra cruda y que fueron sede de centros ceremoniales, del poder político y del religioso. Constituyó una sociedad muy jerarquizada, con recursos humanos y técnicos importantes.

Los mochicas consideraban la muerte como la prolongación de la vida, de manera que los numerosos vestigios, en particular los frescos y las cerámicas, presentes en el mundo de los difuntos, son testimonios de la vida de ese pueblo. En 1899, se desenterraron las primeras huellas de esa cultura en las huacas del Sol y de la Luna, en el valle del río Moche. Luego, en 1987, se descubrió la sepultura intacta del señor de Sipán, hallazgo que constituye el apogeo de la arqueología peruana. La reputación de los mochicas como un pueblo particularmente cruel se apoya en las representaciones de combates, desfiles de prisioneros y sacrificios humanos. Investigaciones complementarias han revelado otras tumbas de dignatarios, como en las huacas del Sol y de la Luna y el complejo arqueológico El Brujo, en el valle del río Chicama.

En este último emplazamiento descubrimos, en 2004, la tumba de una reina: la señora de Cao. Una tumba es un lugar privilegiado para entrever las creencias de un pueblo ligadas a la muerte y comprender la antigua función y posición del difunto en la sociedad.





Coronas (*a*) y otros ornamentos en cobre dorado (*b*), hallados en las diferentes capas que cubrían la momia de la señora de Cao. Esos objetos son emblemas del poder que detentaba la dignataria mochica. Tres acompañantes la rodeaban, uno de ellos en un fardo en excelente estado de conservación (*c*).

Régulo Franco Jordán es arqueólogo de la Fundación Wiese, en Perú.



EL YACIMIENTO DE LA SEÑORA DE CAO

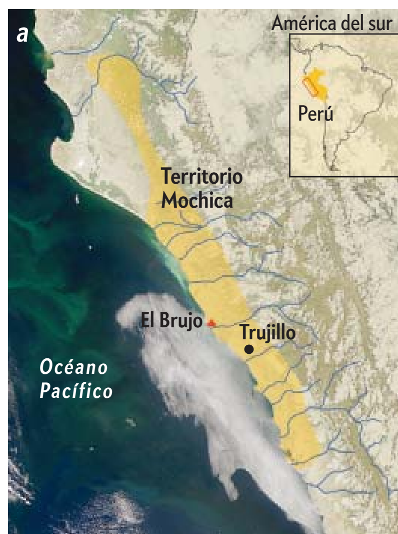
Presentamos aquí el estado y características del cuerpo de la difunta, la arquitectura de la tumba y los objetos que la acompañaban: todo parece indicar que la señora de Cao fue una dirigente del pueblo mochica del valle de Chicama hace 1700 años.

La Fundación Wiese, en colaboración con el Instituto Nacional de Cultura del Perú, dieron a conocer en 2006 el extraordinario descubrimiento que cambia la noción del poder en el antiguo Perú, ya que hasta hace algunos años se consideraba que solo los hombres habían gobernado las civilizaciones precolombinas. Desde mayo de 2006 se han inventariado, analizado y expuesto los vestigios en el actual Museo Cao del complejo El Brujo.

Los mochicas pueden compararse con la cultura maya de Centroamérica. En 2004, Elizabeth Benson, de la Universidad de Harvard, demostró el parecido entre las expresiones artísticas de ambas civilizaciones: el arte cerámico, el uso de caracolas o *Spondylus* (un tipo de molusco bivalvo) y las representaciones iconográficas. Pero uno de los principales aspectos comparativos de ambas culturas, según Benson, son sus imponentes construcciones piramidales: los mayas, en piedra, y los mochicas, en adobe. Además, en ambos casos, los edificios ceremoniales se erigieron en diferentes etapas, en niveles consecutivos. Cada piso contiene tumbas, ofrendas y murales policromos de gran significación religiosa. Pero las semejanzas entre las dos culturas terminan aquí: la civilización mochica duró solo cinco siglos, mientras que los mayas habrían aparecido algunos milenios antes de nuestra era y se habrían dispersado antes de la llegada de los colonos europeos.

El complejo arqueológico El Brujo se ubica unos 60 kilómetros al noroeste de Trujillo, cerca del pueblo de Magdalena de Cao. Es uno de los yacimientos más completos de la costa norte de Perú, con una ocupación cultural continua que abarca 5000 años: desde el precerámico, representado por Huaca Prieta (contemporánea de la civilización caral, la más antigua de América), hasta la ocupación colonial en el siglo XVI, representado por una iglesia colonial fundada por los padres dominicos y los restos de una población indígena de Cao Viejo.

Sin embargo, en el lapso de tiempo de ocupación de El Brujo, la cultura mochica (siglos III-VIII d.C.) experimentó un mayor auge que las otras culturas. Los mochica del valle de Chicama establecieron el poder religioso en el centro ceremonial del complejo El Brujo, donde construyeron dos enormes pirámides de adobe, las huacas Cao Viejo y El Brujo, y diversas construcciones de culto y zonas para sepulturas. El plano del complejo El Brujo refleja una intencionada organización espacial, basada en los dos templos, sistema que aparece también en las huacas del Sol y de la Luna, en el valle del Moche. La Huaca Cao Viejo posee la forma de una pirámide truncada, con una gran plaza ceremonial destinada a funciones públicas; representa el mayor templo del centro ceremonial. Uno de los aspectos sobresalientes de estas pirámides es la presencia de figuras policromas en la fachada principal orientada al nordeste. Las figuras ilustran diversos temas relacionados con la cosmovisión del mundo mochica, particularidad que se observa también en la Huaca de la Luna.





El complejo arqueológico El Brujo cubre más de 5000 años de presencia humana ininterrumpida. Se encuentra a 60 kilómetros al noroeste de Trujillo, en la costa de Perú (*a*). En la pirámide Cao Viejo, los arqueólogos han descubierto un recinto ceremonial de 275 metros cuadrados (*b*) que alberga la tumba de la señora de Cao. La fachada principal del recinto, orientado hacia el noroeste, exhibe numerosos frescos policromos. Los motivos pintados representan peces de agua dulce (*Trichomycterus sp.*) y están constituidos por amplias bandas diagonales policromas con fondos diversos; los colores predominantes son el rojo, el blanco, el azul y el rosado.





Sobre una pared del recinto ceremonial, en paneles en forma de damero (*a*), está representado un personaje antropomorfo con rasgos felinos. Se presenta de frente, acompañado de dos cóndores en las manos y de serpientes que flanquean el cuerpo (*b*). Un oleaje en forma de cresta ornamenta la cabeza, sin duda para representar el cabello. Se distinguen franjas, peces o figuras geométricas. La vestimenta y los colores difieren de un dibujo a otro. Este ser simbolizaría una divinidad perteneciente al mundo de los muertos de la cultura mochica.

UN RECINTO SIMBÓLICO

En 2004 y 2005, se descubrió un gran recinto ceremonial, de 275 metros cuadrados de superficie, ubicado en la esquina noroeste de la plataforma superior de la Huaca Cao Viejo, con hermosos murales policromos que representaban figuras estilizadas de seres sobrenaturales de origen marino y terrestre.

En el interior, en la esquina sudeste se halló un cuarto ceremonial con figuras policromadas en su fachada principal. Se observa en él la representación en damero de un felino estilizado que muchos investigadores interpretan como el «Animal lunar», el «Animal fantástico» o el «Dragón Recuay», debido a que en la iconografía mochica aparece sobre la luna y asociado a las estrellas. Esa figura es una de las más importantes de la iconografía de las etapas iniciales, con frecuencia vinculada a las divinidades o al plano cosmológico.

Otra figura que aparece también en paneles cuadrados en forma de damero es la de un ser antropomorfo con rasgos felinos. Ese personaje representaría una deidad perteneciente al mundo de los muertos; su culto se habría arraigado en la época Mochica Temprano, sin lugar a dudas, durante la vida y después de la muerte de la señora de Cao.

El muro lateral este del recinto exhibe representaciones de peces dispuestos en dirección vertical, unos orientados hacia arriba y otros hacia abajo. El muro norte, con acabado almenado, presenta dos felinos enfrentados separados por un triángulo hueco. El muro oeste fue destruido a lo largo del tiempo. En el recinto se descubrió la tumba de la señora de Cao.

En 2005, las excavaciones sacaron a la luz una vasija de cerámica de pasta fina en forma de lechuza y una gran fosa. En uno de los lados de la fosa se hallaron restos incinerados de objetos diversos: ovillos de hilos de color enrollados en husos de madera, restos de tejidos quemados, agujas de cobre, excrementos de roedor, huesos de pescado, una pequeña figura de madera en forma de mono y fragmentos de cerámica. Se trataba sin duda de un espacio funerario.

Las excavaciones sistemáticas revelaron dos cubiertas de caña brava (una herbácea de grandes dimensiones) unidas entre sí mediante cuerdecillas de junco, que seguramente se habrían utilizado durante el entierro de la señora de Cao. En la fosa se descubrió el fardo que contenía el cuerpo de la difunta. Este presentaba un extraordinario estado de conservación, si se considera la antigüedad del hallazgo y el clima de la costa norte de Perú. No había sufrido el efecto de la humedad de la lluvia o de las infiltraciones, ni de otra forma de agresión externa, ya que se hallaba enterrada a diez metros de profundidad respecto a la superficie actual, en el centro de la pirámide.

Al sur del fardo, se halló un conjunto de vasijas de cerámica, de entre las que destacaban la figura de un dignatario moche sentado con las piernas flexionadas, con un tocado a modo de sombrero y una vasija de caolín (arcilla blanca) que representaba un curandero. Nos llamó especialmente la atención el hallazgo de los restos de una mujer estrangulada con una soguilla de fibra vegetal, recostada a un lado del fardo. No resulta extraño encontrar, en las tumbas de la élite mochica, restos de personas que han sido sacrificadas para la ocasión, como en la tumba del señor de Sipán, otro dignatario de esa cultura.

LA TUMBA DE LA REINA

Al sur de la fosa de la señora de Cao se identificó la osamenta de un adolescente en posición fetal que desgraciadamente fue dañada siglos atrás cuando se levantó el recinto de la dignataria. Teniendo en cuenta la ubicación del esqueleto y la ausencia de ofrendas que le acompañaran, debía de tratarse del guardián de la dignataria (muy parecido al guarda hallado en la tumba del señor de Sipán).

Dentro de fosas alineadas se hallaron otros tres individuos, dos de los cuales presentaban un buen estado de conservación. El personaje más importante, de sexo masculino, correspondía al de la fosa central. A sus pies se descubrieron los restos de una adolescente estrangulada con soguilla de enea, acompañados de vasijas de cerámica que representaban una persona sentada con las manos sobre las rodillas, en postura de adoración.

Otro de los individuos, cerca del muro oeste y en buen estado, presentaba un lazo de estrangulación alrededor del cuello. Estaba acompañado por vasijas de cerámica decorada con peces, a semejanza de los dibujos murales. Por último, el tercer individuo, situado hacia el oeste, se hallaba deteriorado por carecer de un tratamiento especial en su tumba. Correspondía a una persona que habría llevado como ofrenda un mate (fruto de una planta de la familia de las Cucurbitáceas) pirograbado. Pensamos que esos tres personajes poseían una relación de parentesco directo con la señora de Cao, hecho que se comprobará con futuros análisis de ADN.





Objetos de cerámica hallados en la tumba, al lado del fardo que contenía el cuerpo de la señora de Cao. Uno de ellos representa un dignatario sentado con las piernas cruzadas y un tocado a modo de sombrero (*a*); otro, en caolín (arcilla blanca), representa un curandero (*b*). Se cree que el menor que lo acompaña es la señora de Cao, a quien el pueblo mochica atribuiría poderes de curandera.

La apertura del fardo funerario estuvo en manos de la arqueóloga y especialista textil Arabel Fernández López y el antropólogo John Verano, de la Universidad de Tulane, en Nueva Orleans.

Tras la limpieza superficial del fardo, se procedió a la toma de placas radiográficas, lo que permitió identificar en el interior dos porras, platos, pequeñas placas cuadradas de metal, varillas delgadas con cabezas de ave y numerosas joyas junto a la cabeza de la dama. El fardo comprendía además 20 envolturas de tejido.

Procedimos a retirar la primera capa que envolvía todo el fardo; presentaba la figura de un rostro bordado, cosido con puntadas en zigzag. Llamó nuestra atención la distorsión del ojo izquierdo de la figura bordada, atributo que tienen también los frisos del decapitador de la Huaca de la Luna en Moche, divinidad importante de la cultura mochica que practicaba sacrificios humanos para, según parece, apaciguar el furor de las divinidades y reafirmar la posición de la élite dirigente.

La sexta capa comprendía seis niveles de paños cuadrados sobre los que se había cosido placas metálicas de cobre dorado. Estas presentaban huellas de chorreras de algún líquido que se habría derramado durante el rito de la preparación del fardo de la dignataria.

A continuación, se identificaron dos porras laterales y cuatro coronas y diademas cerca de la cabeza. La séptima capa consistía en un manto de tela llana que envolvía el fardo; de modo sorprendente, presentaba un nuevo rostro bordado, semejante al de un mono, pero embadurnado con más cinabrio (sulfato de mercurio, de color rojo, con un gran valor simbólico desde épocas muy antiguas de la cultura peruana) que el primer rostro bordado. Asimismo, el segundo rostro llevaba anillos en las orejas y pequeñas placas doradas repujadas con la figura de un felino.

VESTIMENTA EN BUEN ESTADO DE CONSERVACIÓN

Antes de llegar al cuerpo, se identificaron cuatro vestidos confeccionados con algodón. Dos de ellos se hallaban en buen estado, con diseños pintados de volutas y otros dibujos de peces bordados. Era la primera vez que se descubrían vestidos casi inalterados de un personaje tan importante.

Debajo de los vestidos, apareció una capa de algodón blanco, lista para la confección. Además, en diferentes capas del fardo aparecieron agujas, copos de algodón y husos de madera. Esas materias primas e instrumentos debieron servir para la producción textil; pensamos que se trataría de una de las ocupaciones principales de la soberana. En las dos últimas capas (la 19ª y la 20ª), se encontraron insectos, pero estos no habían dañado el cuerpo.

El rostro de la dignataria estaba cubierto por un plato hondo de cobre dorado que contenía en su interior residuos de cinabrio, sustancia con la que sin duda se untaría el cuerpo. Cinco capas de tejido comprimidas se adherían al cuerpo de la dama. Nos sorprendió descubrir una serie de ornamentos pegados a los tejidos, sobre todo narigueras (joyas para adornar la nariz o la boca).

La señora de Cao reposaba sobre la espalda con los brazos extendidos junto al cuerpo y presentaba la piel conservada. Llevaba puestas sus joyas personales, en concreto, alrededor del cuello y en las orejas.

Entre las representaciones de los ornamentos, se observan cautivos desnudos con una soga alrededor del cuello, la figura del decapitador, animales lunares, alacranes con serpientes bicéfalas, pelícanos, langostinos, arañas, cóndores con la divinidad, etcétera. Cada nariguera tiene una simbología distinta, lo que indica que la gobernanta las utilizaba en cada una de sus presentaciones públicas o ceremoniales.

Admirablemente, la difunta conservaba el cabello largo, con un flequillo corto en la frente. Su piel presentaba tatuajes en los antebrazos, en las manos y en los pies. Las figuras tatuadas representan serpientes, arañas, peces y diseños geométricos abstractos. Probablemente su cuerpo fue limpiado con agua de mar antes de ser untado con cinabrio, un conservante eficaz que sin duda evitó el ataque de los insectos.

Las figuras pintadas en el cuerpo indican el enorme poder que poseía la soberana. Los tatuajes en el antebrazo tienen un alto contenido simbólico: las representaciones de arañas se asocian a la invocación de las lluvias; las de serpientes, a la fertilidad de la tierra. Sin duda se le atribuían a la dama poderes sobrenaturales que le permitían predecir los cambios climáticos o las bondades o fracasos de la agricultura.

Una momia con múltiples capas y en perfecto estado de conservación

En la mayor fosa del recinto principal, los arqueólogos descubrieron el fardo (*a*) que contenía el cuerpo de la señora de Cao. El fardo, de 181 centímetros de largo, 75 centímetros de ancho y 42 centímetros de alto, reposaba sobre troncos de algarrobo y se hallaba cubierto de una capa de fibras vegetales; su peso superaba los 100 kilogramos. Alrededor del fardo, se hallaron diversos objetos calcinados y los restos de una adolescente sacrificada.

El fardo constaba de 20 capas de tela. La primera presentaba la figura de un rostro bordado. La segunda era un manto de algodón de más de tres metros de longitud, con bordes decorados en tapiz. La tercera, una tela llana de algodón que daba 48 vueltas alrededor del cuerpo. Las dos siguientes capas estaban formadas por bandas que envolvían el cuerpo en 13 y 41 vueltas, respectivamente. La sexta capa, comprendía seis niveles de paños cuadrados con placas metálicas de cobre dorado cocidas (*b*).

La séptima capa era un manto de tela llana que envolvía el fardo; presentaba un nuevo rostro bordado, al parecer, de un mono. Desde la 8ª capa hasta la 16ª, se encontraron bandas y paños en cada uno de los niveles. El nivel 17º contenía cuatro vestidos, dos de ellos en buen estado de conservación, con dibujos pintados de volutas o bordados de peces. Debajo de los vestidos apareció una capa de algodón blanco, lista para ser utilizada en confección.

La capa 18ª correspondía a un manto de tela muy fina que contenía siete agujas, seis de oro y una de cobre. Asimismo, formaron parte del inventario 13 copos de algodón y 64 husos de madera. La capa 19ª era un manto de gasa donde se hallaron insectos que, afortunadamente, no estropearon el cuerpo. La capa 20ª estaba constituida por un manto con 31 placas de cobre dorado enlazadas con cintas.

El rostro de la señora de Cao se hallaba cubierto por un plato hondo de cobre dorado que contenía cinabrio (*c*) sustancia con que se untó el cuerpo para asegurar la conservación. El cuerpo poseía varios ornamentos adheridos a los tejidos, como collares y narigueras.

La piel había perdurado y presentaba tatuajes en forma de arañas y serpientes (*d* y *e*). El cuerpo conservaba el cabello, largo y con un flequillo en la frente (*f*). Los tatuajes y los objetos que acompañaban a la difunta indicaban que se trataba de un personaje importante en la cultura mochica a quien se le atribuían poderes de curandera.


a


b


d


e


c


f








Numerosas joyas decoraban el cuerpo de la señora de Cao: 15 collares de oro, cobre y piedras preciosas y semipreciosas, sartas de pendientes de cobre con incrustaciones de turquesa, 44 narigueras en oro y plata, dos de las cuales se encontraron dentro de la boca.



Esta pequeña estatua de madera, cubierta de adornos de cobre, representa un sacerdote guerrero que debió de pertenecer a la corte de la dignataria.

Según Verano, la distensión del vientre hace pensar que su muerte se produjo después de un parto. Su cuerpo presentaba ciertas anomalías, incluso se identificó un absceso en una muela del juicio. Se sabe que algunas poblaciones mochicas sufrían diversas patologías dentarias, aunque por lo general gozaban de buena salud. Debió de fallecer entre los 20 y los 25 años de edad. Mediría 148 centímetros de estatura, la talla media de las mujeres mochicas.

MUJER DE PODER, CURANDERA Y MADRE

Los testimonios de su envestidura, así como los emblemas de poder, hacen a la señora Cao comparable con un personaje importante del tema iconográfico conocido como «La ceremonia del sacrificio». Ese tema se considera fundamental en la religión mochica, ya que los sacrificios humanos formaban parte de las prácticas funerarias de esa cultura.

En suma, la señora de Cao fue una gobernante que ostentó el poder absoluto en el valle de Chicama, que además poseía poderes extraordinarios como sanadora. La tumba real de esta mujer influyente de la civilización mochica representa un hito en la historia de la arqueología peruana. Abre un nuevo capítulo de discusión sobre la función que desempeñaba la mujer en épocas precolombinas. No cabe duda de que este hallazgo contextual constituye, hasta el momento, una prueba sin precedentes del importante rol de la mujer en un templo mochica.

PARA SABER MÁS

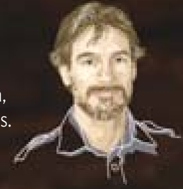
The preceramic excavations at the Huaca Prieta Chicama valley, Peru. Junius B. Bird y John Hyslop en *Anthropological Papers of the American Museum of Natural History New York*, vol. 62, parte 1, 1985.
Iconografía mochica. Anne Marie Hocquenghem. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú; Lima, 1987.
El templo mochica: rituales y ceremonias. Santiago Uceda en *Los Dioses del Antiguo Perú*, págs. 91-101. Colección Artes y Tesoros del Perú, Banco de Crédito del Perú; Lima, 2000.
Los mayas y los mochicas: expresiones en el arte. Elizabeth P. Benson en *Acercarse y Mirar, Homenaje a Beatriz de la Fuente: 283-296*. Universidad Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Estéticas; México, 2004.

EN SÍNTESIS

La serpiente tentaculada es un ofidio pequeño y acuático que habita en el sudeste asiático; recibe este nombre por los apéndices distintivos que sobresalen de los lados de su hocico.

La finalidad de esos tentáculos representaba un misterio desde hacía tiempo. El autor se dispuso a comprobar su función.

Mientras investigaba, descubrió que la serpiente poseía un arsenal de estrategias de caza extraordinariamente avanzadas, que utilizaba de modo innato. Constituía un ejemplo extremo de la supremacía de la herencia sobre el ambiente en el comportamiento animal.



Kenneth C. Catania es profesor de biología en la Universidad Vanderbilt. Centra sus investigaciones en la neurobiología comparada, con énfasis en los sistemas sensoriales animales.

ETOLOGÍA

Un depredador nato

Letal desde el primer día, la serpiente tentaculada emplea tácticas taimadas para capturar peces

Kenneth C. Catania

Los humanos nos sentimos orgullosos de nuestro gran cerebro y conductas complejas. Pero si hay algo que he aprendido como biólogo es que nunca hay que subestimar las capacidades animales, consideradas por muchos primitivas y simples. Los mamíferos suelen enseñarme esta lección. Pero recientemente, la complejidad de los comportamientos que observé en un reptil, la serpiente tentaculada, me dejaron boquiabierto.

La serpiente tentaculada, *Erpeton tentaculatus*, es un ofidio acuático originario de Tailandia, Camboya y Vietnam del Sur. De tamaño reducido (los adultos miden unos sesenta centímetros de longitud), pare crías vivas y se alimenta exclusivamente de peces. El nombre del animal hace referencia a su rasgo más distintivo: el par de tentáculos que surgen de los lados del hocico. Me interesé por primera vez por estos animales hace un decenio, en una nostálgica visita al Zoológico Nacional de Washington, D.C., donde había trabajado algunos veranos cuando era estudiante universitario. Mientras paseaba por la casa de los reptiles descubrí un acuario repleto de vegetación en el que una serpiente tentaculada aguardaba al acecho. Colgaba inmóvil en el agua, intentando hacerse pasar por una ramita. Su cuerpo se hallaba curvado en la característica forma de J que las serpientes adoptan al cazar.

Mientras observaba al animal, me preguntaba sobre la finalidad de sus tentáculos. Ninguna otra serpiente dispone de ellos. Puesto que la especie se alimenta de peces, parecía razonable pensar que los tentáculos servirían como detectores de peces. Pero cuando volví a mi laboratorio de la Universidad Vanderbilt y consulté la bibliografía, descubrí que, a pesar de existir diversas teorías sobre la función de los tentáculos, además de la mía, nadie las había demostrado de forma experimental. De modo que me dispuse a resolver, de una vez por todas, el misterio de los extraños apéndices de la serpiente.

Mientras me esforzaba en averiguar el verdadero propósito de los tentáculos, identifiqué otros aspectos que hicieron aumentar mi interés por la especie. La serpiente tentaculada utiliza una serie de estrategias de ataque muy avanzadas para capturar a sus presas. Incluso las crías poseen esas habilidades, un ejemplo revelador en el que la naturaleza, y no el ambiente, moldea el comportamiento.

EN UN ABRIR Y CERRAR DE OJOS

Antes de comprobar la teoría de que los tentáculos funcionan como detectores de peces debía observar con atención los hábitos de caza de la serpiente, lo que resulta más difícil de lo que pudiera parecer. Las serpientes tentaculadas atacan con una velocidad increíble, y los peces son igualmente rápidos. Toda la contienda entre serpiente y pez se desarrolla en unos 40 milisegundos, es decir, 1/25 de segundo. Para distinguir el proceso registré numerosos ataques de varias serpientes con una cámara de alta velocidad que disparaba entre 500 y 2000 imágenes por segundo, y después reproduje el vídeo a movimiento lento. Mientras observaba los ataques, advertí algo muy extraño: los peces parecían suicidas.

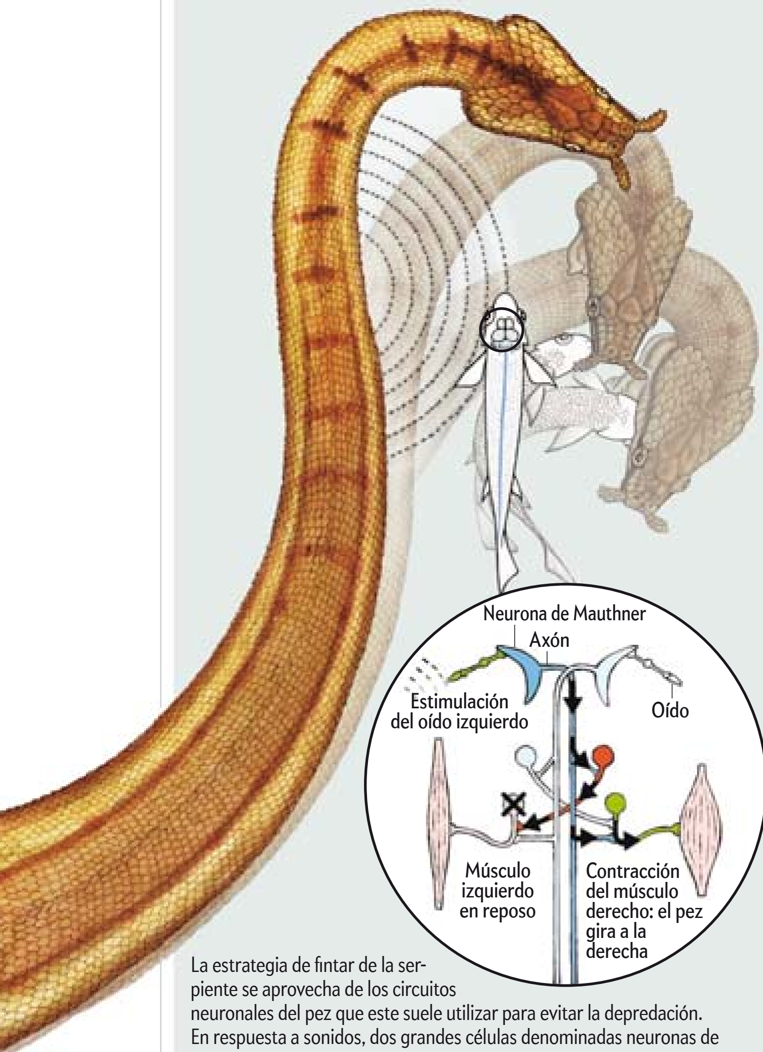
En muchos casos, los peces se desviaban hacia las mandíbulas de la serpiente que se acercaba, y a veces se dirigían directamente a su boca. La conducta de los peces carecía de sentido. Debido a que constituyen la dieta principal de numerosos depredadores, se han convertido en fugitivos expertos: han desarrollado circuitos neurales rápidos y comportamientos igualmente céleres para sentir y evadir a los enemigos. Cuando detectan los sonidos y el movimiento del agua generados por un depredador,

KENNETH C. CATANIA

COMPORTAMIENTO COMPLEJO

Asustar y atacar

Cuando cazan, las serpientes tentaculadas curvan su cuerpo en forma de J, lo que crea una trampa para los peces confiados. Cuando un pez entra en el área cóncava formada por la cabeza y la parte anterior del cuerpo, la serpiente mueve la parte de su cuerpo próxima a la cabeza del pez y se genera una onda de presión que se propaga en el agua. La onda asusta al pez, que sale disparado en la dirección opuesta. Si el pez se halla alineado en paralelo a las mandíbulas de la serpiente durante esta finta, nadará hacia la boca abierta de la serpiente sin darse cuenta de ello. Sin embargo, si cuando se produce la finta el pez ya se halla situado frente a la boca de la serpiente (*dibujo*), esta predecirá la ruta de huida del pez y, antes siquiera de que este se mueva, arremeterá en la posición futura de la cabeza del pez fugitivo, de manera que sus mandíbulas alcanzarán ese lugar en el momento en que lo hará el pez.



La estrategia de fintar de la serpiente se aprovecha de los circuitos neuronales del pez que este suele utilizar para evitar la depredación. En respuesta a sonidos, dos grandes células denominadas neuronas de Mauthner, una a cada lado del cerebro, transmiten señales a lo largo de sus axones hacia el lado opuesto del cuerpo, donde provocan contracciones musculares que hacen que el pez gire hacia la izquierda o la derecha. Un sonido generado por un depredador en el lado izquierdo estimulará la neurona de Mauthner izquierda, cuyo axón cruza al lado derecho del cuerpo y provoca una contracción muscular que hace desviar al animal hacia la derecha. Mientras tanto, ciertas neuronas inhibidoras evitan la contracción de los músculos del lado izquierdo, con lo que se asegura que se produzca el giro adecuado.

PATRICIA J. WYNNE

pueden iniciar la huida en solo seis o siete milisegundos, menos de 1/150 de segundo. Esta reacción de escape, denominada salida en C porque empieza con un pandeo del cuerpo del pez en forma de C, pretende impulsar al pez lejos del depredador. ¿Por qué razón, pues, se dirigían los peces hacia la boca de la serpiente tentaculada?

Descubrí que esa conducta guardaba relación con la insólita postura de caza en J de las serpientes, que representa una suerte de trampa. Los reptiles se abalanzan sobre los peces que han penetrado en el área cóncava de la región en forma de J formada por su cabeza y la parte anterior del cuerpo. El examen detenido del vídeo en movimiento lento reveló que, justo antes de atacar, la serpiente movía una parte de su cuerpo en el lado del pez más alejado de la cabeza del reptil, lo que asustaba al pez y lo hacía dirigirse hacia la boca abierta del depredador. Cuando filmé las acometidas a 2000 imágenes por segundo y registré a la vez los sonidos en el acuario con un micrófono subacuático, determiné que el movimiento del cuerpo de la serpiente justo antes del ataque creaba una onda de presión que se propagaba con la suficiente fuerza para asustar a un pez.

La estrategia de fintar de la serpiente es particularmente insidiosa, porque se aprovecha de los circuitos neurales que suelen operar en favor del pez. Los peces poseen un par de células gigantes, las neuronas de Mauthner, una a cada lado del cerebro. Las prolongaciones neuronales que transmiten señales, los axones, se extienden hacia el lado opuesto del cuerpo. Una carrera entre estas dos neuronas de conducción rápida determina la dirección de la huida. La primera en reaccionar marca el camino. Así, cuando un sonido se origina en el lado izquierdo, los oídos excitan primero la neurona de Mauthner izquierda, que a su vez transmite una señal a lo largo de su axón y estimula neuronas motrices del lado derecho del cuerpo, lo que causa una contracción muscular generalizada que hace girar al pez a la derecha. Al mismo tiempo, ciertas neuronas inhibidoras que cruzan de nuevo a la parte izquierda del cuerpo impiden que los músculos de ese lado se contraigan, lo que asegura que nada interfiera con el giro hacia la derecha. El resultado es una huida increíblemente rápida... a menos que el pez nade demasiado cerca de una serpiente tentaculada. En tal caso, la finta de la serpiente suele desencadenar una cascada de acontecimientos neurales que provocan un giro en la dirección equivocada. Y, desgraciadamente para el pez, la activación simultánea del circuito inhibidor, que por lo general funciona como un seguro, significa que no hay vuelta atrás.

El asombroso truco de la serpiente explica algunas observaciones previas intrigantes. En 1999, John C. Murphy, del Museo Field de Historia Natural, de Chicago, informó que los peces eran ingeridos en pocos momentos. A veces desaparecían por completo durante la acometida de la serpiente, captada en una imagen de su vídeo de 30 imágenes por segundo, una acción mucho más rápida de lo esperado. Mis vídeos de alta velocidad revelan que incluso cuando los peces no nadan directamente hacia la boca de la serpiente, el giro que realizan hacia ella ayuda al reptil a capturarlos por la cabeza, la manera más rápida que tiene una serpiente para tragarse un pez. Esta ingestión instantánea no solo permite a la serpiente comer más a menudo, sino que también ayuda a mantener velada su identidad de depredador (es difícil hacerse pasar por un palito inocuo si otros peces han visto devorar a un camarada). Además, las serpientes cuentan con sus propios depredadores, que pueden verlas con mayor facilidad cuando se tragan un pez, de manera que una pitanza rápida reduce las probabilidades de que el depredador se convierta en presa.

PREDECIR LOS ACONTECIMIENTOS

El psicólogo B. F. Skinner afirmó una vez: «Cuando halles algo interesante, deja todo lo demás y estúdialo». Con ese estado de ánimo decidí abandonar temporalmente el examen de los tentáculos y concentrarme en el comportamiento depredador de la serpiente, hecho que me permitió revelar nuevos trucos en el repertorio del reptil.

Aunque asustar a los peces para que colaboren en la arremetida constituye una estrategia impresionante, esta solo funciona cuando el pez se sitúa en el «punto preciso» entre la cabeza y el cuello de la serpiente y en paralelo a sus mandíbulas. ¿Qué ocurre cuando el pez se orienta de otro modo? Debido a que la respuesta de huida impele al pez hacia la izquierda o hacia la derecha, la serpiente no puede atraer a un pez hacia su boca si este ya se halla en dicha dirección. En ese caso, emplea otra estrategia aún más extraordinaria: predice el comportamiento del pez. Primero realiza una finta para asustar al pez y alejarlo de ella, y hace que adopte una ruta paralela a las mandíbulas de la serpiente. Después, antes incluso de que el pez se mueva, arremete contra la posición futura de la cabeza de este, de manera que sus mandíbulas alcanzan dicho punto en el momento justo en que llega el malhadado pez. Los sucesos se producen con demasiada rapidez para que la serpiente pueda utilizar la información visual para calcular el movimiento de su presa durante el ataque: ha de planear la acción con anterioridad. En algunos experimentos se comprobó que el pez no se alejaba del cuerpo al fintar —la táctica no es perfecta—, pero aun así la serpiente arremetió en la dirección en la que el pez debería haberse movido si hubiera reaccionado de la manera usual. Ese comportamiento confirmaba que la serpiente atacaba sobre la base de una predicción, en lugar de seguir el movimiento del pez.

A veces las serpientes acometían a un pez sin haber conseguido que adoptara una dirección determinada. Pero en su mayor parte, aguardaban pacientemente a que la presa entrara en la trampa formada por su cuerpo en forma de J. Para mi sorpresa, observé nuevos tipos de arremetidas planeadas con esa postura, que variaban en función de la posición del pez. En una variante contorsionista, las serpientes doblaban la cabeza bajo el cuerpo para interceptar de frente a un pez que huía. Parece que las serpientes tentaculadas disponen de una amplia gama de estrategias de ataque, de entre las que eligen según la situación que se presente. Las acometidas planeadas hacían formularse una pregunta interesante. ¿Aprenden a lo largo de la vida las serpientes tentaculadas a predecir los movimientos de un pez que sale en C, o bien nacen con esa capacidad? Tuve la suerte de que varias de nuestras serpientes se reprodujeran. Cuando sometimos a las crías a pruebas con peces vivos, arremetieron claramente hacia la posición futura de los peces (cuando estos se hallaban en la posición adecuada), lo que demostraba que al nacer ya sabían el modo en que se mueve un pez y la mejor manera de atraparlo.

Al informar de nuestros hallazgos el año pasado en *PLoS ONE*, observamos que esa capacidad innata atestigua la larga historia evolutiva de las serpientes tentaculadas depredadoras de peces, hecho relacionado con una de las cuestiones fundamentales de la biología, a saber, la importancia relativa de la herencia y del ambiente en el desarrollo del comportamiento. En las serpientes tentaculadas, el peso de la herencia es máximo, al menos en lo que se refiere a las arremetidas de las crías. La respuesta previsible de los peces ante una perturbación súbita del agua proporcionó un marco para la evolución. Las serpientes adquirieron un comportamiento innato (las arremetidas planeadas) al sacar partido de otra conducta también innata (la reacción de huida de los peces).



Los tentáculos escamosos que se ven en esta micrografía electrónica de barrido perciben el menor movimiento del agua, por lo que constituyen un excelente detector de peces.

KENNETH C. CATANIA

El que los peces no hayan desarrollado una contraestrategia sugiere que las serpientes tentaculadas actúan como «enemigos raros», según definió Stephen Jay Gould, ya que se aprovechan del comportamiento normalmente adaptativo de otra especie. Los peces tienen muchos depredadores; la mayor parte del tiempo su mejor respuesta ante una perturbación repentina del agua consiste en huir en la dirección contraria. Pero el pez infortunado se encuentra con esa serpiente, que lo engaña para que se dirija hacia ella en lugar de adoptar la dirección opuesta.

VER EN LA OSCURIDAD

En cuanto a los tentáculos, junto con mis colaboradores Duncan B. Leitch y Danielle Gauthier, realizamos una serie de investigaciones para determinar su función. En 2010 publicamos los resultados en el *Journal of Experimental Biology*. Mediante el examen de la anatomía de las terminaciones nerviosas en los apéndices, sus respuestas a diversos estímulos y su trazado en el cerebro, demostramos que los tentáculos son órganos táctiles excepcionalmente sensibles que perciben desplazamientos del agua generados por objetos que se mueven en las inmediaciones. Es decir, los tentáculos funcionan como cabría esperar de un órgano detector de peces en un depredador que utiliza la emboscada. También filmamos a serpientes bajo iluminación infrarroja, que no pueden ver, y demostramos que cazaban peces sin usar la vista. Aparentemente, los tentáculos permiten a las serpientes identificar y capturar peces de noche o en aguas fangosas. Provista de un detector de movimientos de primer orden y con la capacidad de asustar a su presa para llevarla a una muerte segura, una serpiente tentaculada es la peor pesadilla de un pez.

PARA SABER MÁS

Tentacled snakes turn C-starts to their advantage and predict future prey behavior. Kenneth C. Catania en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 106, n.º 27, págs. 1183-1187, 7 de Julio de 2009.

Function of the appendages in tentacled snakes (*Erpeton tentaculatus*). K. C. Catania *et al.* en *Journal of Experimental Biology*, vol. 213, n.º 3, págs. 359-367, febrero de 2010.

Born knowing: Tentacled snakes innately predict future prey behavior. Kenneth C. Catania en *PLoS ONE*, vol. 5, n.º 6, e10953, 16 de junio de 2010.

María Teresa Beltrán es doctora en astrofísica por la Universidad de Barcelona. Desde 2009 trabaja en el Observatorio Astrofísico de Arcetri, en Florencia, como investigadora del Instituto Nacional de Astrofísica italiano. Su investigación se centra en las primeras fases de los procesos de gestación estelar, donde destaca por sus trabajos sobre la formación de estrellas masivas.



ASTROFÍSICA

La formación de estrellas masivas

Las estrellas mucho mayores que el Sol desempeñan un papel fundamental en la génesis y evolución de las galaxias. Su nacimiento, sin embargo, se encuentra aún envuelto en numerosas incógnitas

María Teresa Beltrán

¿CÓMO —Y POR QUÉ— NACEN LAS ESTRELLAS MUY MASIVAS? Estos astros, cuya masa puede exceder 50 veces la del Sol y cuyas temperaturas superan en ocasiones los 40.000 grados (la del Sol no pasa de 6000), revisten suma importancia en astrofísica. En ellas se sintetizan los elementos pesados, a partir de los cuales se forman los planetas y otros cuerpos celestes. Además, inyectan energía en el medio interestelar por medio de sus vientos estelares y a través de las violentas explosiones de supernova que caracterizan el final de sus días, con lo que contribuyen a regular la tasa de formación estelar en su entorno. En definitiva, son las estrellas masivas quienes dominan la apariencia y evolución de las galaxias.

Pero, a pesar de su importancia, sus mecanismos de formación han recibido muy poca atención a lo largo de la historia. Ello se debe a las grandes dificultades que suponen su observación y estudio. Por otra parte, la sola existencia de estrellas muy masivas plantea una paradoja desde el punto de vista teórico: en principio, parecería que tales estrellas no deberían existir en el firmamento. A pesar de que aún queda un largo camino por recorrer, a lo largo de los últimos años se han efectuado avances considerables en nuestra comprensión de los fenómenos que dan origen a las estrellas masivas. En particular, la detección de estructuras aplanadas en rotación y de material en colapso hacia estrellas masivas jóvenes parece indicar que estas se formarían por acreción no esférica, una propiedad que podría explicar la razón de ser de estos astros.

EL DESAFÍO OBSERVACIONAL

En general, el estudio de los procesos de formación estelar reviste grandes dificultades. Toda estrella nace a partir del colapso de una gigantesca nube de gas y polvo, la cual oculta lo que sucede en su interior en un amplio intervalo de longitudes de onda. Además, las protoestrellas no emiten radiación en longitudes de onda visibles, por lo que no pueden observarse con telescopios ópticos.

En el caso de las estrellas de gran masa, la situación se complica aún más. Estos astros se forman con suma rapidez, en unos 10.000 o 100.000 años —un tiempo muy inferior a los 10 millones de años que requeriría una estrella como el Sol—, por lo que resulta difícil atraparlas en el momento de su gestación. Además, las estrellas masivas no abundan en el firmamento: por

EN SÍNTESIS

Las estrellas masivas desempeñan papeles centrales en astrofísica: sintetizan los elementos pesados, inyectan energía en el medio interestelar y contribuyen a regular la tasa de formación estelar. Sin embargo, es muy poco lo que se conoce sobre su gestación.

Esas estrellas plantean una curiosa paradoja: todo apunta a que su ignición tiene lugar antes de que hayan agregado su masa final. Una vez encendidas, la radiación debería dispersar el gas y polvo circundantes, lo que les impediría seguir creciendo.

Se desconoce el modo en que continúan acumulando masa tras la ignición. Se ha propuesto que nacerían a partir de la fusión de estrellas menores, pero ello requiere que se formen en cúmulos estelares con densidades mayores a las que se han observado.

Investigaciones recientes han demostrado que algunas estrellas acretan el material a través de estructuras discoidales. Estas disminuyen la presión de radiación sobre el material en colapso, lo que permite la acreción ulterior de masa.

THOMAS MEGEATH, UNIVERSIDAD DE TOLEDO (EE.UU.)/NASA/JPL-CALTECH

La nebulosa de Orión: Esta imagen en el infrarrojo, tomada con el telescopio espacial Spitzer, muestra la región de formación de estrellas masivas más próxima a la Tierra. La nebulosa, que dista unos 1500 años luz, contiene unas 1000 estrellas jóvenes (*centro*), las cuales iluminan la nube de gas y polvo que las rodea (*rojizo*). Sus potentes vientos estelares han barrido parte de la nube y han abierto en ella una cavidad (*región inferior derecha*).

De nubes de gas a bolas de fuego

El proceso de formación de las estrellas de masa baja (hasta ocho masas solares) se conoce con cierto detalle. Se resume en cinco etapas que comienzan con el colapso gravitatorio de una nube de gas y polvo. La génesis de estrellas masivas, en cambio, sigue planteando incógnitas.

NUBE DE GAS Y POLVO

La nube se halla inicialmente en equilibrio hidrostático, en lenta rotación y soportada por campos magnéticos.

1 Cuando es alcanzada por una perturbación, la nube comienza a colapsar bajo su propio peso.
t = 0

2 Se forma en el centro una protoestrella, que continúa acretando el material de la nube a través de un disco circunestelar, también en rotación. Por conservación del momento angular, parte del material se expulsa hacia el exterior en forma de flujos de gas a lo largo del eje de rotación del sistema.
t ≤ 10.000 años

Flujo molecular

Protoestrella

Disco circunestelar

3 Con el paso del tiempo, se ensancha la cavidad abierta por el flujo. Cada vez quedará menos material por acretar.
t = 100.000 años

4 Finalmente, el flujo dispersa los restos de la nube. El sistema formado por la protoestrella y el disco se hace visible.
t = 1-10 millones de años

5 El material del disco acabará por incorporarse al objeto estelar joven o formará planetas a su alrededor. La estrella en formación continuará contrayéndose hasta que se alcancen las condiciones de temperatura y densidad necesarias para que comiencen las reacciones termonucleares de fusión del hidrógeno. Habrá nacido entonces una estrella.
t > 10 millones de años

MARÍA TERESA BELTRÁN Y LUCA CARBONARO

cada estrella de diez masas solares nacen unas 100 estrellas del tamaño del Sol. Ello las convierte en objetos raros y muy dispersos que, en particular, no abundan en nuestra vecindad estelar. Orión, la región de formación estelar masiva más cercana a nosotros, se encuentra a la nada despreciable distancia de unos 1500 años luz.

Otro de los problemas observacionales que comporta el estudio de las estrellas masivas se debe a que no nacen aisladas, sino en el seno de cúmulos estelares, por lo que el gas, el polvo y las estrellas circundantes generan una gran contaminación visual. Por último, dado que las estrellas de gran tamaño se originan a partir de enormes nubes de gas y polvo, las reacciones de fusión termonuclear que inflaman el astro comienzan cuando este aún se halla inmerso en las profundidades de su nube progenitora. Ello impide observar sus primeros estadios, tanto en el visible como en el infrarrojo cercano. Se requieren observaciones de muy alta resolución angular y en longitudes de onda de radio, milimétricas y en el infrarrojo lejano para escudriñar el interior de esas nubes. Solo así resulta posible conocer las condiciones iniciales y los mecanismos involucrados en su proceso de formación.

Pero no todo son dificultades. Una ventaja obvia de las estrellas masivas reside en su gran luminosidad. Las estrellas masivas en proceso de formación se encuentran a temperaturas muy elevadas, superiores a los 10.000 grados, y emiten radiación ultravioleta con energía suficiente como para ionizar el hidrógeno circundante. Esas nubes de hidrógeno ionizado, denominadas regiones H II, emiten con gran intensidad en un amplio intervalo de longitudes de onda, desde el ultravioleta hasta el radio.

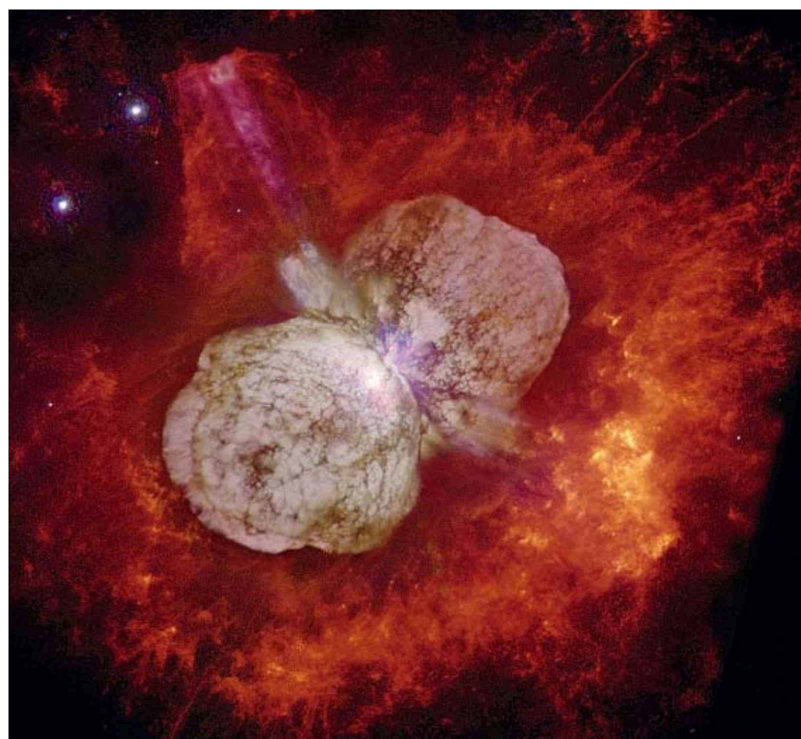
Además, en las zonas de formación de estrellas masivas existe una gran variedad de elementos químicos. En los denominados núcleos calientes, que son regiones caracterizadas por temperaturas superiores a los 100 grados Kelvin (la temperatura de la nube es de unos 10 grados Kelvin) y que emiten en multitud de líneas moleculares, abundan las moléculas hidrogenadas, como el amoníaco y el sulfuro de hidrógeno; el deuterio; los óxidos de silicio, azufre y nitrógeno; el monóxido de carbono, gran variedad de moléculas orgánicas, como metanol, etanol, formiato de metilo o ácido fórmico, y moléculas prebióticas, como el glicoaldehído. Semejante variedad permite estimar y estudiar los parámetros físicos de estas regiones, como su temperatura, densidad y masa. Además, con ayuda de las líneas espectrales puede estudiarse la cinemática de los objetos estelares más jóvenes. Como veremos, en algunos casos resulta posible distinguir movimientos de rotación, de colapso, o de expulsión del material.

ASÍ NACE UNA ESTRELLA

En el caso de las estrellas de masa baja, el proceso de gestación se conoce con relativo detalle. Todo comienza con el colapso gravitatorio de una nube de gas y polvo. Según la teoría vigente, formulada en los años setenta y ochenta del siglo pasado y corroborada por un gran número de observaciones, esas nubes se encuentran inicialmente en un estado de equilibrio hidrostático, caracterizado por una rotación lenta y soportadas por campos magnéticos. No obstante, ese equilibrio es inestable: una vez alcanzada por una perturbación que se propague por el medio interestelar (una onda de choque, turbulencias del medio o la influencia de estrellas recién formadas), la nube se precipitará sobre sí misma por efecto de su propio peso.

El colapso comienza en el interior de la nube, la región de mayor densidad, y se propaga hacia el exterior a la velocidad del sonido. Primero cae el material que puebla las capas más internas y, de manera sucesiva, el de las capas superiores. En el centro se forma con rapidez un embrión estelar hidrostático, denominado protoestrella, que crece a medida que acreta el gas y polvo circundantes. Dado que la nube original se halla en rotación, la materia se precipita en espiral hacia el interior y forma un disco circunestelar. Al tiempo que la protoestrella incorpora el material del disco, por conservación del momento angular se genera un potente viento estelar a lo largo del eje de rotación del sistema (la dirección perpendicular al disco). Así se expulsa parte del material circunestelar en forma de chorros o flujos moleculares, los cuales suelen ser muy energéticos, colimados y, a menudo, bipolares. Esos chorros abren una cavidad en la envoltura que rodea a la protoestrella y el disco. Con el tiempo, el ángulo de abertura de la cavidad se ensancha, el flujo molecular barre todo el material circundante y el sistema central formado por la protoestrella y el disco queda al descubierto. Los objetos estelares visibles más jóvenes se conocen bajo el nombre de estrellas T Tauri.

En una etapa posterior el disco desaparece, ya sea porque la materia que contiene se incorpora a la protoestrella, forma un sistema planetario o porque acaba dispersándose. Después, la protoestrella se contrae aún más. Su temperatura y densidad aumentan y, en cierto momento, se alcanzan las condiciones necesarias para que se desencadenen las reacciones de fusión termonuclear del hidrógeno que encienden la estrella. En ese momento, el objeto ha entrado en la fase conocida como «secuencia principal de edad cero».



Más de 100 masas solares: El telescopio espacial Hubble captó esta impresionante imagen en la que se aprecia cómo la estrella supermasiva Eta Carinae (*centro*), sita a 7500 años luz de distancia, expulsa nubes de gas y polvo. Con una masa estimada de entre 100 y 150 masas solares, se trata de una de las mayores estrellas conocidas. Su luminosidad es unos cuatro millones de veces superior a la del Sol.

KRIS DAVIDSON, UNIVERSIDAD DE MINNESOTA/JON MORSE, UNIVERSIDAD DE COLORADO/NASA

LA PARADOJA DE LAS ESTRELLAS MASIVAS

Todo lo anterior sucede de la manera descrita cuando se trata de estrellas de masa baja, como el Sol. En el caso de astros mucho mayores, sin embargo, los mecanismos de gestación no resultan tan evidentes. La mayor incógnita procede del hecho de que las estrellas masivas alcanzan la secuencia principal de edad cero cuando aún se encuentran inmersas en la nube progenitora de gas y polvo.

Para entenderlo, notemos primero que en el proceso anterior intervienen dos escalas de tiempo: el tiempo de acreción, que es el que la protoestrella tarda en incorporar en su seno el material circundante, y el tiempo de contracción, que es el que necesita para contraerse y alcanzar la temperatura a la que da comienzo la ignición. Ambas escalas dependen de manera distinta de la masa del objeto central, por lo que, dependiendo del valor de dicha masa, una escala de tiempo predominará sobre la otra.

En concreto, los cálculos indican que ambos tiempos coinciden cuando la masa del objeto asciende a ocho masas solares. Para estrellas menores, el tiempo de acreción resulta inferior al de contracción. Por ello, cuando la protoestrella ya ha acretado todo el material circunestelar y ha alcanzado su masa final, continúa contrayéndose y calentándose, y solo después comienza la ignición del hidrógeno. Sin embargo, cuando la nube progenitora es mucho mayor, la protoestrella crecerá hasta acumular una masa igual a ocho veces la del Sol. Dado que a partir de esa masa crítica el tiempo de contracción resulta inferior al de acreción, el astro colapsará con rapidez y comenzará a quemar hi-

drógeno cuando aún se halla rodeado por los restos de la nube. El problema reside en que, una vez que ha comenzado la ignición, el potente viento estelar y la enorme cantidad de radiación de alta energía emitida por la estrella recién nacida deberían dispersar el material circundante. En principio, la estrella ya no podría crecer más.

De todo lo anterior se deriva una curiosa paradoja: las estrellas con una masa superior a ocho masas solares no deberían existir en el firmamento. No obstante, basta con mirar a Rigel, Spica, Alnitak, o Eta Carinae (esta última con una masa estimada de entre 100 y 150 veces la del Sol) para convencernos de lo contrario. Hemos de concluir, por tanto, que la teoría de formación estelar que hemos esbozado aquí no puede extrapolarse con facilidad al caso de las estrellas masivas.

Uno de los modelos que evitaría el problema anterior sería el de coalescencia o fusión estelar. Según dicha propuesta, el colapso de las nubes solo daría lugar a estrellas menores. Las estrellas masivas, por su parte, no se formarían de manera aislada, sino en cúmulos estelares compuestos por numerosas estrellas de masa baja. Estas, al chocar, se fusionarían y acabarían por originar estrellas de tamaños mayores. De hecho, las observaciones de alta resolución angular sugieren que las estrellas masivas nacen en cúmulos. El problema con este modelo reside en que requiere densidades estelares muy elevadas, del orden de 10^6 estrellas por pársec cúbico (un pársec equivale a unos 3,3 años luz); un valor mucho mayor que el observado, por ejemplo, en la región de Orión, que no supera las 10^4 estrellas por pársec cúbico. (En comparación, la densidad media de estrellas en la Vía Láctea es de una estrella por pársec cúbico.)

No obstante, existen propuestas para explicar la formación de estrellas masivas sin recurrir a la fusión de astros de menor tamaño. Durante el proceso de acreción de masa hacia la estrella, el obstáculo principal para una acumulación ulterior de material más allá del límite de las ocho masas solares proviene de la presión de radiación que la estrella recién inflamada ejerce sobre la nube circundante. Sin embargo, el astro podría continuar agre-

ESTRELLAS MASIVAS

¿Coalescencia o acreción no esférica?

Las estrellas con masas superiores a las ocho masas solares plantean una curiosa paradoja. Dado que han de formarse a partir de gigantescas nubes de gas y polvo, la ignición del hidrógeno comienza antes de que el astro haya acretado toda su masa final. Pero, una vez la estrella ha comenzado a radiar, los vientos estelares y la presión de radiación deberían dispersar los restos de la nube circundante, por lo que, en principio, el objeto no podría agregar más masa. Sin embargo, es un hecho que las estrellas masivas existen en el firmamento. Para explicarlo se han propuesto varios modelos.

Modelo de coalescencia
Varias estrellas menores pertenecientes a un cúmulo denso se fusionan para dar lugar a una estrella masiva. Su principal problema reside en que requiere densidades estelares superiores a las observadas.

Modelos de acreción no esférica
Las estrellas masivas se formarían gracias a la acreción de material a través de estructuras discoidales circunestelares. Al igual que sucede en la formación de estrellas de masa baja, la conservación del momento angular provocaría la aparición de flujos de expulsión de material a lo largo del eje de rotación del sistema. Dichos flujos excavarían una abertura en la nube por la que escaparía una fracción significativa de los fotones estelares. Ello reduciría la presión de radiación en la región ecuatorial de la estrella y facilitaría la agregación del material en colapso.

MARÍA TERESA BELTRÁN Y LUCA CARBONARO

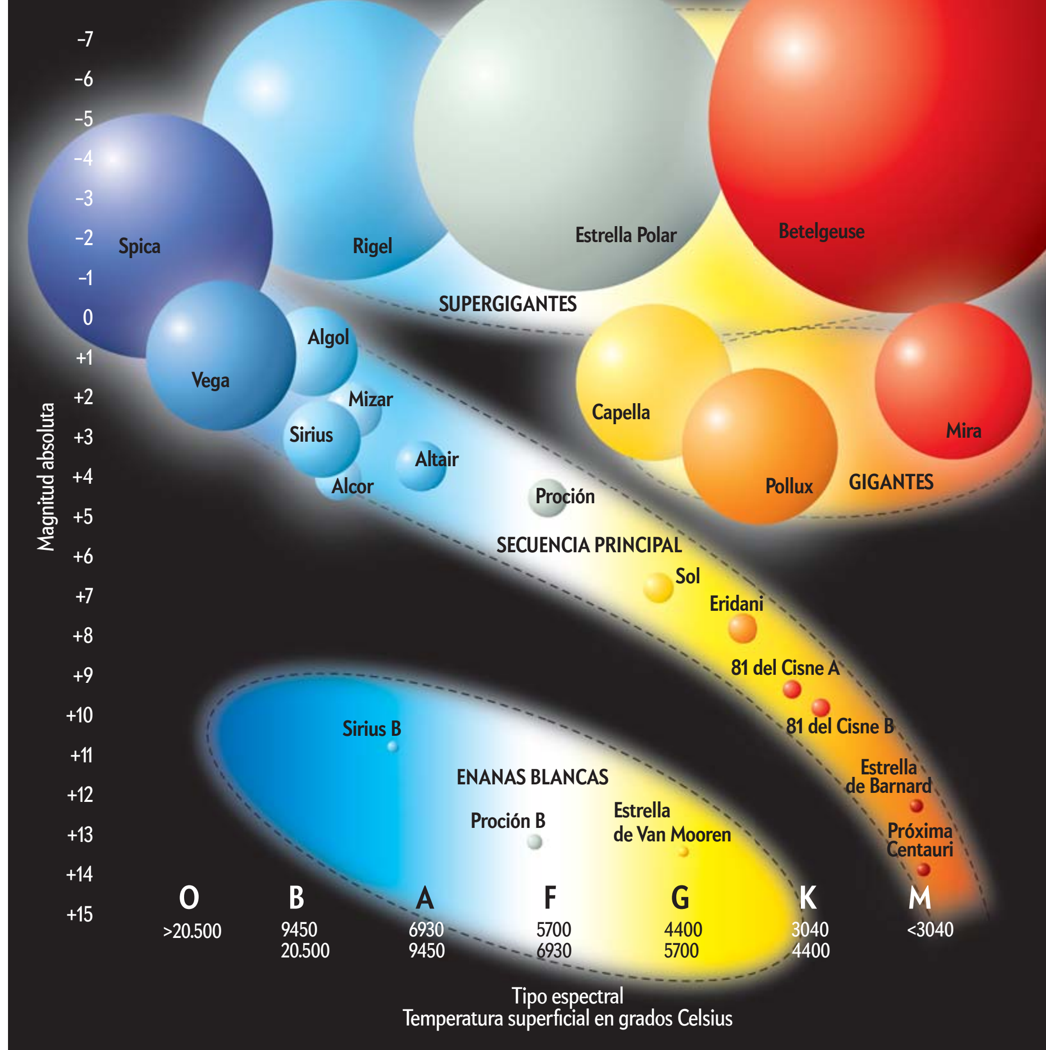


Diagrama de Hertzprung-Russell: Este tipo de representación muestra la relación existente entre la temperatura de una estrella y su magnitud absoluta (la cantidad de luz que emite). Se emplea a menudo para clasificar las estrellas según sus tipos espectrales y para estudiar la evolución estelar. Se incluyen aquí algunos objetos representativos de cada clase. Las estrellas masivas que nos ocupan son las pertenecientes a los tipos espectrales O y B.

gando material si, de algún modo, la atracción gravitatoria fuese mayor que la presión de radiación. Para que ello ocurra, una posibilidad consistiría en algún mecanismo que acelerase el proceso de agregación de material; otra, en la formación de estructuras que amortiguasen el efecto de la luminosidad del astro sobre la nube progenitora.

ACRECIÓN RÁPIDA

Algunos modelos sugieren tasas de acreción del orden de 10^{-4} o 10^{-3} masas solares por año, que resultan mucho mayores que las que se han observado en las regiones de formación de estrellas de masa baja (del orden de 10^{-6} o 10^{-5} masas solares por año). Un incremento semejante podría tener lugar en núcleos muy turbulentos, o también mediante procesos de acreción competitiva en cúmulos estelares densos: en presencia de varias estrellas, todas ellas competirían por el material circundante y algunas acabarían absorbiendo gas y polvo a una velocidad mucho mayor que el resto. La tasa de acreción de los miembros más masivos del cúmulo se relacionaría de manera directa con el número de compañeras estelares.

Uno de los problemas a la hora de verificar tales modelos radica en la dificultad de medir las tasas de acreción. Debido a las grandes distancias a las que se encuentran las regiones de formación de estrellas masivas, resulta casi imposible conseguir la resolución angular necesaria para observar las inmediaciones del astro objeto de estudio. Con todo, existen métodos indirectos para estimar las tasas de acreción. Uno de ellos consiste en calcular la cantidad de material que expulsan los flujos moleculares a lo largo del eje polar de la estrella, ya que ambas cantidades se hallan relacionadas. Esa pérdida de masa resulta más fácil de calcular, ya que los flujos moleculares exhiben un gran tamaño y sus propiedades físicas pueden determinarse con relativa facilidad. A finales de los años noventa se detectaron los primeros flujos moleculares en estrellas masivas y se midieron tasas de pérdida unas 10 veces superiores a las observadas en las estrellas de masa baja. Ese resultado sugiere unas tasas de acreción superiores a las observadas en las estrellas de masa baja.

A su vez, una acreción rápida resolvería otro de los problemas asociados a la formación de estrellas masivas: al ritmo de acreción observado en las estrellas de masa baja (unas 10^{-5} masas solares por año), una estrella de 10 masas solares tardaría más de un millón de años en formarse. Sin embargo, en ese tiempo una estrella semejante ya debería haberse extinguido (debido a su gran luminosidad, las estrellas masivas consumen su combustible nuclear con suma rapidez). Por tanto, a las tasas de acreción características de las estrellas de masa baja, las estrellas masivas morirían antes de haber acretado el material necesario para alcanzar su masa final.

DISCOS Y TOROIDES

Una posible solución a los problemas anteriores la proporcionan los modelos de acreción no esférica con tasas de acreción elevadas. En ellos, la formación de estructuras discoidales serviría para contrarrestar los efectos de la presión de radiación y acelerar la tasa de acreción de material hacia el astro. Ello se debe a que, al igual que ocurre en el caso de las estrellas de masa baja, si la acreción tuviese lugar a través de un disco circunestelar, deberían aparecer flujos moleculares a lo largo del eje de rotación del sistema. Dichos flujos excavarían una abertura en la nube por la que escaparía una fracción significativa de los fotones estelares. Ello reduciría la presión de radiación en la región ecuatorial de la estrella y facilitaría la agregación del material en colapso. Vemos, pues, que los modelos de acreción no esférica implican la presencia de estructuras discoidales y de flujos moleculares perpendiculares a ellas. A simple vista, estos modelos parecerían una versión a escala de la teoría de formación de estrellas de masa baja. Sin embargo, las propiedades físicas de los flujos moleculares y de las estructuras discoidales (como su geometría, masa, tamaño o temperatura) resultan muy diferentes, lo que crea nuevos problemas. En particular, las tasas de acreción del material habrían de ser mucho mayores. Se-

MARÍA TERESA BELTRÁN Y LUCA CARBONARO

gún algunas simulaciones, ello implicaría la inestabilidad de dichas estructuras: estas acabarían fragmentándose y la estrella no podría seguir acretando masa.

La presencia de flujos moleculares se ha visto confirmada en objetos estelares jóvenes de cualquier luminosidad y masa; en particular, en más del 70 por ciento de las estrellas masivas estudiadas. Durante los últimos años también han aumentado las pruebas relativas a la existencia de estructuras discoidales, perpendiculares a los flujos moleculares. El indicativo de que el movimiento del gas es de rotación (y no de expansión, por ejemplo) proviene de la detección de gradientes de velocidad perpendiculares a la dirección del flujo molecular.

Las estructuras discoidales que se han observado en estrellas masivas jóvenes pueden clasificarse en dos tipos: discos y toroides. Ello depende de la luminosidad y de la masa de la estrella central. Las estrellas que nos ocupan —aquellas con masas superiores a ocho masas solares— pertenecen a los tipos espectrales B y O. (En orden decreciente de temperatura, las estrellas se clasifican en siete tipos espectrales principales: O, B, A, F, G, K y M.) En las estrellas de tipo B, con luminosidades inferiores a 10^5 veces la del Sol, se han detectado discos circunestelares con masas equiparables a la de la estrella central (entre 4 y 20 masas solares) y radios de unas 1000 unidades astronómicas (1 unidad astronómica equivale a la distancia que media entre la Tierra y el Sol). En tales casos, la masa de la estrella central domina el potencial gravitatorio del sistema y el disco gira en rotación kepleriana. Hasta la fecha, se han encontrado pruebas de la presencia de discos en rotación asociados a flujos moleculares en aproximadamente una docena de estrellas. El caso más representativo y mejor estudiado lo proporciona la protoestrella IRAS 20126+4104, una estrella de tipo B de unas 10^4 luminosidades solares.

Por otra parte, en las estrellas de tipo espectral O, aquellas con luminosidades superiores a 10^5 veces la del Sol, se han ob-

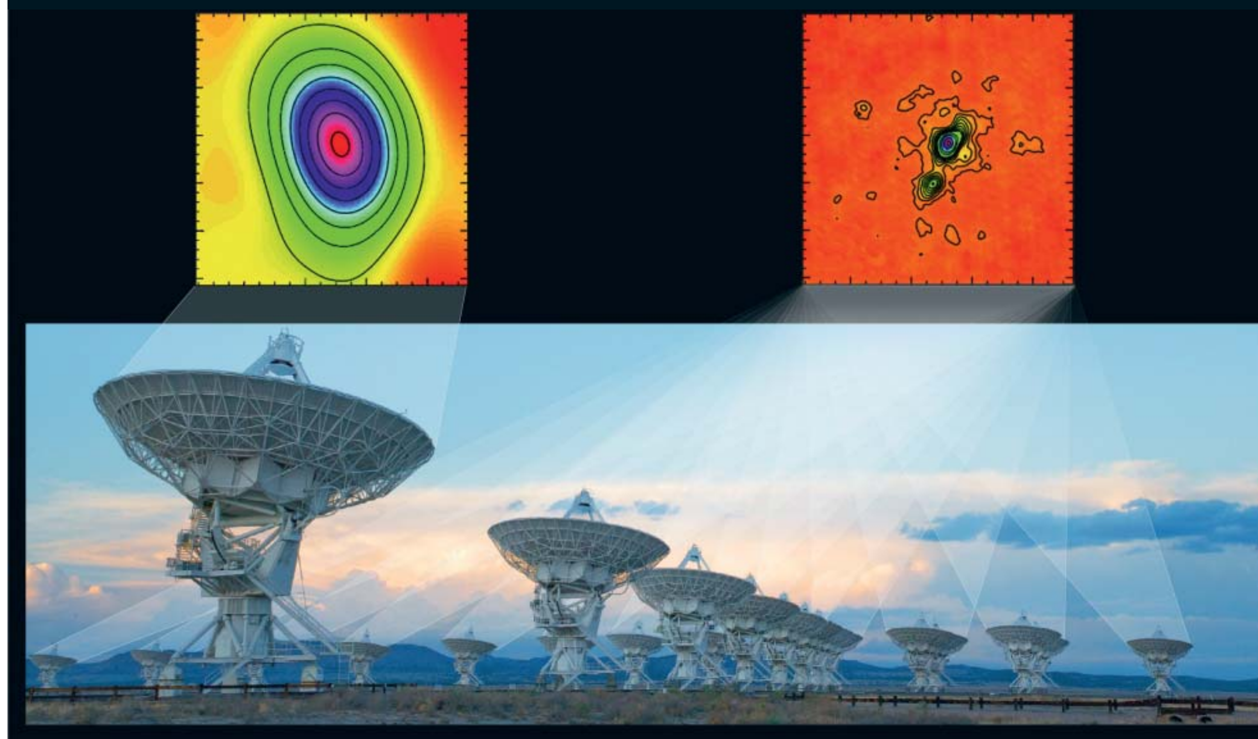
TÉCNICAS INTERFEROMÉTRICAS

Baterías de telescopios

La interferometría es una técnica muy utilizada en radioastronomía que consiste en combinar la señal de varios radiotelescopios para aumentar la resolución de la imagen. Cuando se observa un objeto con varias antenas a la vez, la resolución final se corresponde con la que se obtendría empleando un único radiotelescopio cuyo diámetro igualase la separación máxima entre las antenas. En general, a mayor diámetro (real o efectivo) del telescopio, mayor resolución angular. Ello se traduce en detalles cada vez más finos.

En los ejemplos que reproducimos aquí, vemos que la imagen del objeto estelar G24.78+0.08 tomada con un único radiotelescopio (*izquierda*) no logra resolver la fuente central; sin embargo, cuando esta se observa con un interferómetro (*derecha*), sí se aprecia la estructura de los focos de emisión. Al estudiar la formación estelar, una mayor resolución angular permite distinguir lo que sucede en las inmediaciones de la estrella, el lugar donde los movimientos de colapso cobran importancia.

El mayor radiointerferómetro del mundo es el Very Large Array (*fotografía*), en Nuevo México. Consta de 27 antenas que observan en longitudes de onda centimétricas y milimétricas, instaladas a lo largo de tres brazos dispuestos en forma de Y de casi 20 kilómetros de longitud. En el desierto de Atacama, en Chile, se está terminando de construir la batería de telescopios Atacama Large Millimeter Array (ALMA), la cual contará con 50 antenas y observará en el intervalo de longitudes de onda milimétricas y submilimétricas. Se espera que esté totalmente operativa en 2013.



MARÍA TERESA BELTRÁN Y LUCA CARBONARO (*gráficas*); CORTESÍA DE NRAO/AUI/NSF (*fotografía*)

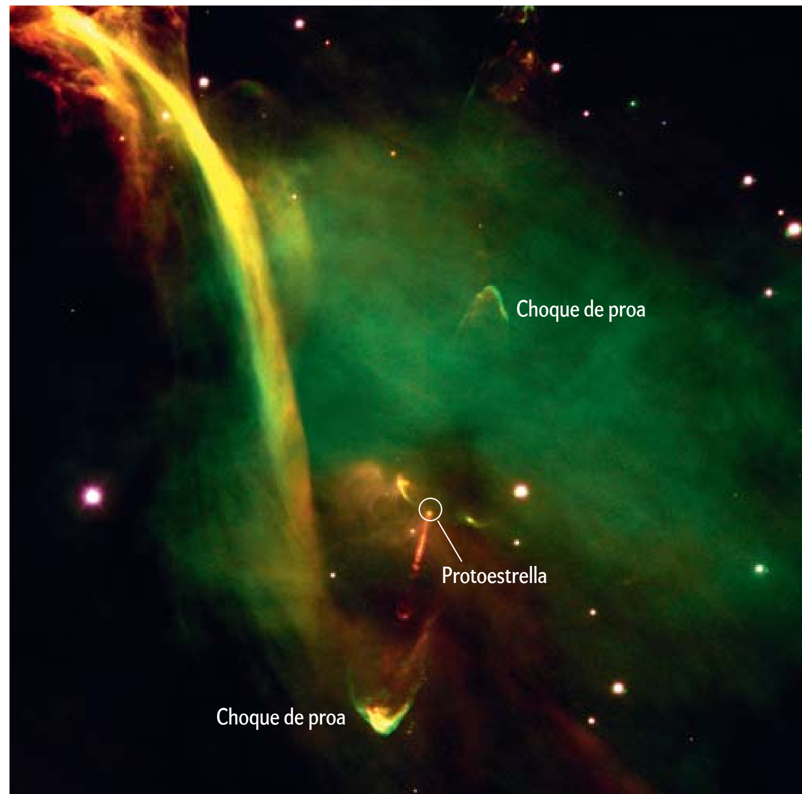
servado toroides (estructuras con forma de rosquilla) circunestelares masivos. Estos toroides difieren en gran medida de los discos observados alrededor de las estrellas de masa baja, a partir de los cuales se forman los sistemas planetarios como el nuestro. Sus masas ascienden a cientos de masas solares y sus radios alcanzan unas 10.000 unidades astronómicas. Dichas estructuras no pueden hallarse en rotación kepleriana, ya que su masa excede con mucho a la de la estrella central. Además, parece probable que no rodeen a una única estrella, sino a un cúmulo. Hasta la fecha no se han detectado discos circunestelares alrededor de estrellas de tipo O. Por ello, algunos modelos teóricos, como el de coalescencia, sugieren que tales discos no existen y que las estrellas con masas superiores no se formarían por acreción. Sin embargo, que no se hayan detectado no significa que no existan. Los discos podrían hallarse en el interior de los toroides masivos, por lo que resultarían difíciles de detectar con la instrumentación actual.

UN PUNTO DE REFERENCIA

Hasta la fecha, se han detectado muy pocos toroides en rotación alrededor de estrellas masivas. Los casos más evidentes se han observado en los núcleos calientes G31.41+0.31 y G24.78+0.08 (el nombre de estos objetos viene dado por sus coordenadas galácticas), donde también se han detectado flujos moleculares perpendiculares a dichos toroides. No obstante, la presencia de discos y toroides en rotación no basta para confirmar el modelo de acreción no esférica. Un requisito clave consiste en demostrar que el material está siendo acretado por la estrella; es decir, que exhibe un movimiento de caída hacia el astro. Ello supone una tarea complicada, ya que la velocidad del material en caída libre solo se torna significativa en las inmediaciones de la estrella, a unas 1000 unidades astronómicas, distancias que no pueden resolverse con facilidad en el caso de objetos tan lejanos como los que nos ocupan. Además, la gran cantidad de material existente en esas regiones puede inducir a error a la hora de interpretar la cinemática del gas.

Nuestro grupo de investigación decidió buscar señales de colapso en G24.78+0.08. Esta región, situada a unos 7,7 kilopársecs de distancia, contiene un cúmulo de objetos estelares muy jóvenes, algunos de los cuales se hallan en el centro de toroides en rotación. Uno de tales objetos, G24.78+0.08 A1, ha creado a su alrededor una región H II de unas 1500 unidades astronómicas de diámetro. Además, exhibe un poderoso flujo molecular en la dirección del eje de rotación del toroide. El espectro en el continuo de esta estrella se corresponde con el de una estrella en la secuencia principal de edad cero y de tipo espectral O9,5, lo que permite calcular su masa en unas 20 masas solares. Su luminosidad asciende a unas 33.000 veces la del Sol.

La región H II se muestra muy brillante en longitudes de onda centimétricas, en el dominio de las ondas de radio, y su temperatura supera los 2000 grados Kelvin. El gas del toroide, por su parte, se encuentra mucho más frío, a unos 100 grados Kelvin. En consecuencia, la emisión proveniente de la región central, cercana a la estrella, es absorbida por el material del toroide, por lo que pueden observarse las líneas espectrales en absorción. Si, además de girar, el gas del toroide se hallase en caída hacia la estrella central, las líneas espectrales de las moléculas del gas deberían verse desplazadas hacia el rojo a causa del efecto Doppler, ya que el gas, situado entre la estrella y la Tierra, se estaría alejando de nosotros. Así, decidimos observar una de las líneas de transición del amoníaco (una de las moléculas presentes en el gas) con una longitud de onda de 1,3 centímetros. Para ello, empleamos el Very Large Array, un conjunto de 27 radiotelescopios pertenecientes al Observatorio Nacional de Radioastronomía de EE.UU., en el estado de Nuevo México.



Flujos moleculares: **La protoestrella Herbig-Haro 34, en la región de Orión, proyecta dos chorros que expulsan consigo material circunestelar en direcciones opuestas a una velocidad de unos 250 kilómetros por segundo. En la imagen, tomada con el Very Large Telescope del Observatorio Europeo Austral, en Chile, se aprecia la onda de choque (*shock bow*, o «choque de proa») de los flujos moleculares contra el medio interestelar.**

Nuestras observaciones pusieron de manifiesto la acreción de material hacia G24.78+0.08 A1, una de las pocas detecciones directas de colapso en una estrella masiva joven hasta la fecha. Nuestros resultados indicaban que el gas del toroide caía en espiral hacia la región H II a una velocidad de unos 2 kilómetros por segundo, lo que confirmaba la acreción sobre la estrella de tipo O situada en el centro. Por vez primera, se detectaban a la vez estructuras en rotación en torno a una estrella masiva joven, el colapso del gas hacia el astro y flujos moleculares de expulsión de material. Estos resultados confirman de manera inequívoca los modelos de acreción no esférica en las teorías de formación de estrellas masivas.

Todo lo anterior sugiere que las estrellas masivas, al menos aquellas de hasta 20 masas solares, nacerían de manera análoga a sus hermanas menores, aunque los parámetros físicos involucrados en el proceso (masa, tamaño, tasas de acreción y expulsión del material, etcétera) serían varios órdenes de magnitud superiores. De hecho, en el caso de G24.78+0.08 A1, se calcula una tasa de acreción de hasta 10^{-2} masas solares por año. Dicho valor resulta lo bastante elevado como para que el material en colapso supere la presión de radiación, se incorpore a la estrella y esta continúe aumentando su tamaño.

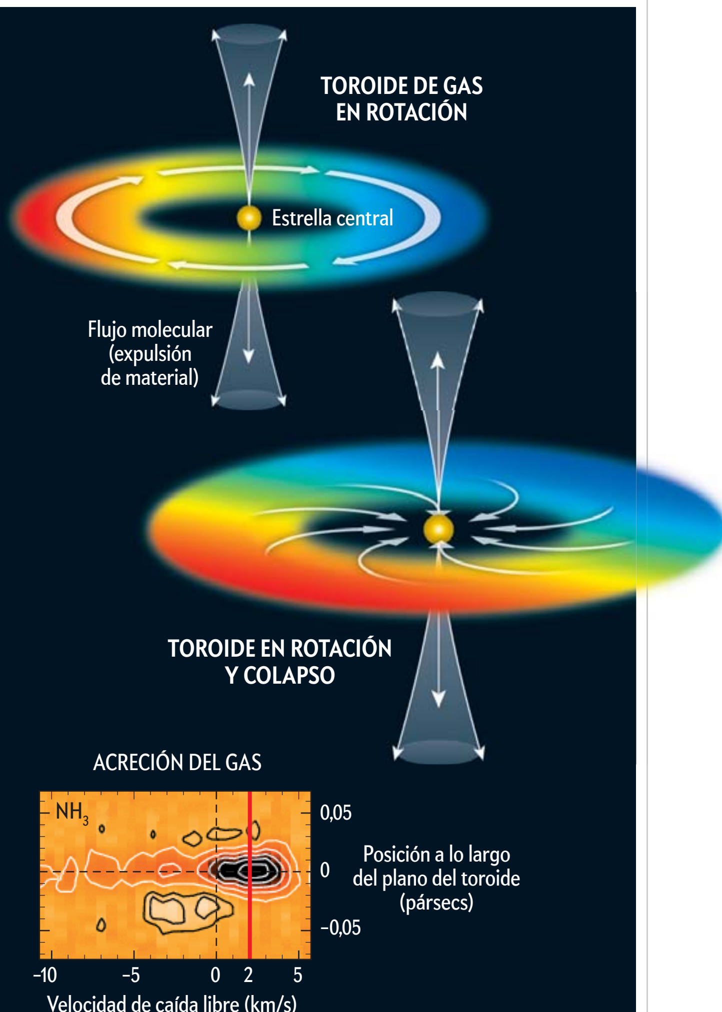
PRUEBAS DE ACRECIÓN NO ESFÉRICA

Toroides, flujos moleculares y colapso

La región G24.78+0.08 (el nombre denota sus coordenadas galácticas) contiene varios objetos estelares masivos jóvenes. En ellos se han detectado flujos moleculares de expulsión de material (*conos grises*) y gradientes de velocidad (*escalas de color*) perpendiculares a dichos flujos. Los gradientes reflejan la existencia de una estructura discoidal (un toroide) en rotación en torno al astro, ya que se deben al efecto Doppler en las regiones en las que el gas se acerca (*azul*) o se aleja (*rojo*) del observador.

No obstante, una confirmación definitiva del modelo de acreción no esférica requiere demostrar que, además de rotar, el gas del toroide se incorpora a la estrella. Dado que el toroide se interpone entre el astro y la Tierra, un desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales del gas indicaría que este se aleja de nosotros y, por tanto, cae en espiral hacia la estrella (*figura central*).

En el objeto estelar masivo G24.78+0.08 A1, una estrella en la secuencia principal de edad cero, de tipo espectral O9,5 y con una masa unas 20 veces mayor que la del Sol, se observó justamente dicho efecto en una de las líneas del amoníaco, una de las especies presentes en el gas del toroide. El desplazamiento se correspondía con una velocidad radial de caída libre de 2 kilómetros por segundo (*gráfica inferior*). El resultado implica una tasa de acreción de hasta 10^{-2} masas solares por año, un valor lo bastante elevado como para que el material en colapso supere la presión de radiación, se incorpore a la estrella y esta continúe aumentando su tamaño. La presencia de estructuras en rotación, la existencia de flujos moleculares y el colapso del material hacia el astro confirman los modelos de acreción no esférica para explicar la formación de estrellas de hasta 20 masas solares.



MARÍA TERESA BELTRÁN, FUENTE: «INFALL OF GAS AS THE FORMATION MECHANISM OF STARS UP TO 20 TIMES MORE MASSIVE THAN THE SUN», M. T. BELTRÁN ET AL. EN *NATURE*, VOL. 443, 28 DE SEPTIEMBRE DE 2006 (*gráfica*)

PREGUNTAS SIN RESOLVER

Sin duda, la detección simultánea de rotación, colapso y expulsión en G24.78+0.08 A1 avala los modelos de acreción no esférica con tasas de acreción elevadas. Sin embargo, queda aún por demostrar que la acreción de material a través de discos y toroides supone un fenómeno habitual en la formación de estrellas masivas; en particular, en el caso de las estrellas de tipo espectral O, muy luminosas, en las que la presión de radiación aparece como un serio obstáculo a la acreción de material. Por otra parte, aún hemos de comprobar si las estrellas con masas superiores a las 20 o 30 masas solares también se forman mediante mecanismos de acreción, o si tales astros se originan a partir de la fusión de estrellas menores.

Otra cuestión pendiente la plantea la ausencia de discos de acreción alrededor de las estrellas de tipo O. Puede que tales discos desaparezcan con rapidez durante el proceso de formación de la estrella, o quizá simplemente queden ocultos por los toroides que se han observado alrededor de estos astros. Además, la presencia de discos circunestelares se encuentra estrechamente ligada a la existencia de planetas extrasolares alrededor de estrellas de tipo O, ya que, hasta la fecha, no se ha detectado ninguno.

Con todo, y pesar de los grandes avances de los últimos años, a día de hoy no existe ningún modelo que explique por completo el proceso de formación de las estrellas masivas. Los próximos observatorios desempeñarán un papel crucial al respecto. En particular, la batería de radiotelescopios Atacama Large Millimeter Array (ALMA), en Chile, comenzará a operar con 16 antenas a finales de este año, y se espera que funcione con 50 hacia 2013. Su sensibilidad y resolución de imagen deberían permitir la detección de discos de acreción alrededor de estrellas de más de 10 masas solares situadas a más de 65.000 años luz de distancia, una distancia que cubre toda la galaxia. La búsqueda de discos circunestelares en torno a las estrellas de tipo espectral O nos permitirá entender el proceso de formación de estos astros fundamentales en la evolución de las galaxias.

PARA SABER MÁS

Introducción a la física del medio interestelar. R. Estalella y G. Anglada. Textos Docents, 50. Edicions Universitat de Barcelona, 1999.

Infall of gas as the formation mechanism of stars up to 20 times more massive than the Sun. M. T. Beltrán et al. en *Nature*, vol. 443, págs. 427-429, 28 de septiembre de 2006.

The critical role of disks in the formation of high-mass stars. R. Cesaroni et al. en *Nature*, vol. 444, págs. 703-706, 7 de diciembre de 2006.

The Formation of Massive Stars. H. Beuther et al. en *Protostars and Planets V*, dirigido por B. Reipurth, D. Jewitt y K. Keil. University of Arizona Press. Tucson, 2006.

Formation of massive stars. M. T. Beltrán en *Computational Star Formation*, dirigido por J. Alves, B. G. Elmegreen, J. M. Girart y V. Trimble. *Proceedings of the International Astronomical Union Symposium 270*, págs. 33-40, 2011.

por Norbert Treitz



Norbert Treitz es profesor emérito de didáctica de la física en la Universidad de Duisburg-Essen.

Del principio de incertidumbre al color del tomate

Una demostración sencilla de las longitudes de onda en que absorben y emiten los colorantes de carbono

En general, no puede determinarse la frecuencia de un fenómeno vibratorio con una exactitud mayor que la que resulta de contar las oscilaciones que se suceden durante un intervalo de tiempo Δt. Dado que dicha cantidad solo puede ser un número entero, el orden de magnitud del error que cometeremos al contarlas será la unidad, lo que deriva en un error en la frecuencia dado por $\Delta f \approx 1/\Delta t$. Esta relación de incertidumbre se aplica a todo fenómeno vibratorio u ondulatorio, y solo se convierte en una expresión cuántica cuando se introduce la fórmula $E = hf$, que relaciona la energía de un fotón con su frecuencia [*véase* «De una nota desafinada al principio de incertidumbre», por N. Treitz; Investigación y Ciencia, marzo de 2011].

Posición y momento

Si multiplicamos la velocidad c de una onda por el tiempo de avance t, obtendremos la distancia recorrida por un punto de fase constante: $x = ct$. Por otro lado, el inverso de la longitud de onda λ se calcula dividiendo la frecuencia entre la velocidad: $1/\lambda = f/c$. Si insertamos estas dos expresiones en nuestra relación de incertidumbre para el tiempo y la frecuencia, obtendremos una relación entre la indeterminación del inverso de la longitud de onda y la del camino recorrido: $\Delta(1/\lambda)\,\Delta x \approx 1$.

Lo anterior se aplica a todo tipo de ondas, también a las clásicas. Consideremos ahora un fotón. Si dividimos ambos lados de la ecuación $E = hf$ entre c (donde ahora c denota la velocidad de la luz), el resultado es $p = h/\lambda$, donde $p = E/c$ se corresponde con el momento del fotón. Louis-Victor de Broglie aventuró en 1924 que la ecuación anterior debía satisfacerse para cualquier partícula, aun cuando su masa en reposo fuese distinta de cero. Dicho postulado se mostró correcto: los experimentos de interferencia y difracción con electrones indican que estos exhiben un comportamiento ondulatorio (similar, por ejemplo, al de los rayos X) y que su longitud de onda asociada se corresponde, precisamente, con la que dicta la relación de De Broglie.

Si ahora insertamos la fórmula de De Broglie en la relación de incertidumbre para la posición y la longitud de onda, obtendremos la famosa ecuación de incertidumbre de Heisenberg: $\Delta x\,\Delta p \approx h$. Aquí, Δx denota la imprecisión a la hora de localizar a la partícula sobre cierto eje, y Δp expresa la incertidumbre asociada a la componente del momento de la partícula sobre dicha dirección.

En términos físicos, lo anterior nos dice que, si una partícula se desplaza con un momento bien definido, resulta imposible determinar con total exactitud su posición a lo largo de la dirección de movimiento. Por otra parte, si la partícula oscila o rota, entonces sí podremos acotar su posición dentro de cierto intervalo Δx. Pero el precio a pagar será que su momento, que fluctúa y cambia de signo, no podrá determinarse más allá de los valores $\pm\Delta p$ que nos dicta la relación de incertidumbre.

¿Electrones en el núcleo?

Antes del descubrimiento del neutrón, en 1932, se pensaba que los átomos constaban de un núcleo compuesto por protones y electrones. La radiación beta, el tipo de

Expresión clásica:	$\Delta f\,\Delta t \approx 1$	$\Delta x\,\Delta(1/\lambda) \approx 1$
Relación entre:	Incertidumbre en la frecuencia y duración de la medida	Camino recorrido e incertidumbre en el inverso de la longitud de onda
Al multiplicar por h:	$\Delta(hf)\,\Delta t \approx h$	$\Delta x\,\Delta(h/\lambda) \approx h$
Relación onda-partícula:	$E = hf$ (Einstein)	$p = h/\lambda$ (de Broglie)
Resultado:	$\Delta E\,\Delta t \approx h$ (Heisenberg)	$\Delta x\,\Delta p \approx h$ (Heisenberg)
Relación entre:	Energía y tiempo	Posición y momento

Las relaciones de incertidumbre comienzan en la mecánica clásica. La precisión a la hora de medir la frecuencia de una vibración (*columna central*) resulta inversamente proporcional al tiempo que invirtamos en la medición. En el caso de un fenómeno ondulatorio (*columna derecha*), determinar con precisión la longitud de onda requiere considerar un tren de ondas lo bastante largo. Solo cuando se emplean las expresiones cuánticas $E = hf$ y $p = h/\lambda$, las relaciones anteriores se convierten en el principio de incertidumbre de Heisenberg.



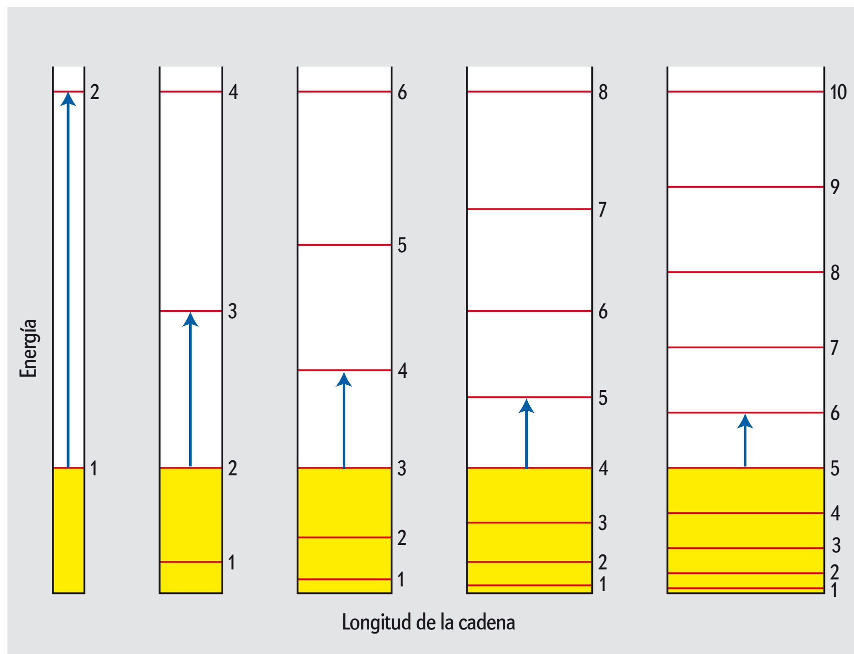


emisión por la que un núcleo atómico expulsa electrones, parecía confirmar dicha suposición. Pero la relación de incertidumbre entre la posición y el momento nos dice que los electrones no pueden residir en un núcleo atómico. El radio de un núcleo se estima en unos pocos fermis (10^{-15} metros). A una indeterminación tan pequeña para la posición solo puede corresponderle una gran incertidumbre Δp en el momento. Por su parte, el momento p debe alcanzar valores del mismo orden que Δp, ya que el valor promedio de p es nulo (el electrón no se desplaza, sino que permanece confinado en el átomo). Ello implica que un electrón atrapado en el núcleo debería poseer una energía cinética, dada por $E_c = p^2/(2m)$, también muy elevada. Tales energías se muestran mucho mayores que las que se han observado en los experimentos de física atómica.

¿Cómo se explica entonces la radiación beta? En la actualidad sabemos que los núcleos atómicos se componen de protones y neutrones. Durante la emisión beta, un neutrón del núcleo se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino. Por otra parte, la baja energía observada en los electrones emitidos implica que estos no pueden permanecer largo tiempo en el núcleo. Como hemos visto, a una energía baja le corresponde una pequeña indeterminación en el momento y, en consecuencia, una gran incertidumbre en la posición. Esta resulta ser mucho mayor que el tamaño del núcleo, por lo que los electrones no pueden permanecer confinados allí.

Entonces, ¿por qué los protones y neutrones sí permanecen en el núcleo? Para no escapar, la incertidumbre en el momento debe ser equiparable a la que antes exigíamos a los electrones. Sin embargo, la masa del protón o el neutrón es unas 2000 veces mayor que la del electrón. En consecuencia, debido al término $2m$ en el denominador de la expresión para la energía cinética, esta será mucho menor; a saber, del orden de algunos megaelectronvoltios (MeV). Aquí, al contrario de lo que ocurría con los electrones, el principio de incertidumbre implica un valor para la energía que sí concuerda con el observado en los protones y neutrones del átomo.

El radio de un átomo resulta entre 10.000 y 100.000 veces mayor que el del núcleo; la relación de incertidumbre permite que electrones con una energía de algunos electronvoltios queden confinados en ese espacio. En los átomos más sencillos, la imprecisión en la posición de los electrones es equiparable al radio de su órbita. Por ello, la imagen semiclásica de los modelos de Bohr y Sommerfeld, en la que los electrones se mueven en torno al núcleo en órbitas circulares o elípticas, no deja de ser una metáfora. Si desea entender por qué, intente dibujar una circunferencia con un pincel tan grueso como el pretendido radio de la figura.



Para el electrón que ocupa el nivel de energía más alto, la transición hasta el nivel vacante más próximo (*flecha azul*) resulta tanto menor cuanto más larga es la cadena de átomos de carbono. En concreto, la diferencia de energía es inversamente proporcional a la longitud de la cadena.

Carreras de electrones

El principio que acabamos de esbozar, que afirma que la incertidumbre en la posición es, en orden de magnitud, similar al espacio disponible, no solo se aplica a un átomo, sino también a cadenas de ellos. Como veremos, a partir de él puede derivarse la siguiente ley empírica de la química de colorantes:

> La longitud de onda de la luz absorbida por una cadena de carbono resulta proporcional a la longitud de la cadena.

Los diferentes tipos de carotenoides constituyen ejemplos sencillos. Existe incluso una clase de compuestos para los que un cálculo simple proporciona valo-

FELINDA/ISTOCKPHOTO (*tomates*), MASALTOF/ISTOCKPHOTO (*remolacha*), ELENA SCHWEITZER/ISTOCKPHOTO (*zanahorias*); SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN NORBERT TREITZ (*gráfico*)







Cuanto mayor es la cadena de carbono de la molécula de un carotenoide, más hacia el rojo se halla la luz que absorbe el compuesto.

IMPROVIZ/DREAMSTIME (*pimientos*), MAGDALENA YARAMOVA/DREAMSTIME (*fresas*), YASONYA/DREAMSTIME (*chiles*)

res sorprendentemente precisos: los compuestos polimetínicos (carbocianinas). Se trata de uno de los pocos ejemplos en mecánica cuántica en los que pueden obtenerse resultados correctos con un esfuerzo razonable.

Dichas moléculas de colorante constan de cadenas de $2N$ átomos de carbono en las que se producen variaciones de enlaces simples y dobles (enlaces dobles conjugados). En el caso extremo, que en los polimetinos ocurre a menudo, todos los núcleos atómicos se hallan separados por la misma distancia, $L = 0{,}14$ nanómetros, y se encuentran unidos por el mismo tipo de enlace. Un total de $2N$ electrones, uno por átomo, se encuentran desvinculados por completo de su átomo madre, por lo que pueden desplazarse con total libertad de un extremo a otro de la cadena, de longitud $2NL$.

Según la relación de De Broglie, a un electrón con momento p le corresponde una longitud de onda igual a $\lambda = h/p$. En un estado estacionario, esas ondas tienen que «acomodarse» a lo largo de la cadena de carbono. En concreto, su longitud de onda ha de ser tal que, entre los dos extremos de la cadena, quepa exactamente un número entero de semilongitudes de onda. Se trata del mismo fenómeno por el que la cuerda de una guitarra no puede sonar con cualquier nota, sino solo con aquellas cuya longitud de onda es tal que la oscilación «muere» en los extremos de la cuerda, que permanecen fijos. En nuestro caso, las longitudes de onda permitidas para los electrones que se desplazan por el polimetino vienen dadas por $\lambda_n = 4NL/n$, donde n representa cualquier número entero.

Por tanto, los momentos permitidos quedan determinados por $p_n = hn/(4NL)$; es decir, separados por intervalos de magnitud $h/(4NL)$. Según la ecuación de la mecánica clásica —que aquí continúa siendo aplicable—, a un electrón de momento p_n y masa m le corresponde una energía cinética dada por $E_n = n^2h^2/(32mN^2L^2)$. Vemos, pues, que hay un nivel energético posible para cada valor de n, y que el espectro de energías crece con el cuadrado de n.

Las propiedades de los colorantes

Los electrones se hallan confinados en el polimetino, por lo que su incertidumbre espacial es finita y, de acuerdo con la relación de Heisenberg, también lo será la indeterminación en el momento. Dado que el valor medio del momento es cero (van y vuelven a lo largo de la molécula), su valor será del mismo orden que el de la incertidumbre. Por otro lado, cualquier sistema físico tiende con naturalidad a alcanzar su estado de energía más baja, por lo que podemos suponer que nuestra configuración de $2N$ electrones se encuentra en su estado fundamental.

Wolfgang Pauli formuló el principio según el cual, en un mismo sistema físico, dos electrones (o, en general, dos fermiones), nunca pueden hallarse a la vez en el mismo estado cuántico. El estado de un electrón no solo queda determinado por su energía, sino también por su espín, un número relacionado con la rotación de la partícula sobre su propio eje. Para un electrón, el espín adopta uno de dos valores posibles. Por tanto, en cada nivel energético E_n podrá haber, como máximo, dos electrones. Cuando el sistema se encuentre en su estado fundamental, los $2N$ electrones se situarán en los $2N$ estados cuyas energías sumen el valor más bajo posible. Por tanto, habrá una pareja de electrones en cada uno de los niveles E_n de menor energía, que no son otros que aquellos en los que n toma los valores $n = 1, 2, ..., N$.

Cada uno de los dos electrones del nivel energético superior poseerá una energía $E_N = h^2/(32mL^2)$. Vemos que este valor no depende de la longitud de la cadena ($2NL$). ¿Por qué cambia entonces el aspecto del colorante con el tamaño de la molécula?

Una molécula solo puede absorber los fotones que posean la energía necesaria para promocionar un electrón a un nivel de energía superior. Consideremos el mínimo salto energético posible: aquel entre el nivel más alto ocupado, E_N, y el primer estado vacante, E_{N+1}. La diferencia de energía entre ambos viene dada por $E_{N,\,N+1} = E_N((N + 1)^2 - N^2)/N^2$. El factor en el numerador es igual a $2N + 1$, que, para cadenas largas de carbono (donde N es mucho mayor que la unidad), puede aproximarse por $2N$. Por tanto, la diferencia de energía entre el estado fundamental de la molécula y el primer estado excitado viene dada por

$$E_{N,\,N+1} = h^2/(16mNL^2),$$

luego resulta inversamente proporcional a la longitud de la cadena.

La energía de los fotones absorbidos (y reemitidos después por la molécula cuando esta regrese a su estado fundamental) ha de ser igual a dicha diferencia de energía. Empleando la relación de Einstein para la energía del fotón, podemos calcular la frecuencia de la luz que interviene en el proceso: $f_{N,\,N+1} = h/(16\,mNL^2)$, la cual se corresponde con una longitud de onda dada por

$$\lambda_{N,\,N+1} = 16\,mNL^2c/h.$$

Como vemos, la longitud de onda absorbida por el colorante resulta proporcional a la longitud de cadena, $2NL$. (Siempre dentro de nuestra aproximación para cadenas largas e ignorando los efectos de borde en los extremos de la molécula.) Así pues, hemos derivado la regla empírica de la química de colorantes a través de consideraciones simples sobre la mecánica de las ondas.

por Agustín Rayo

Agustín Rayo es investigador en el departamento de filosofía del Instituto de Tecnología de Massachusetts.



¿Qué es la probabilidad?

O de cuánta información podemos extraer al cuantificar nuestra ignorancia

Las probabilidades inundan nuestras vidas. Viajamos en avión porque consideramos que la probabilidad de un accidente es baja; leemos Investigación y Ciencia porque creemos que la probabilidad de que sus artículos sean veraces es elevada; contratamos seguros contra incendios porque estimamos que, aunque su probabilidad sea pequeña, no lo es tanto como para ignorarla... Pero ¿qué son las probabilidades? ¿Qué quiere decir que, al tirar una moneda al aire, la probabilidad de que salga cruz es del 50 por ciento?

Resulta tentador pensar que, si la probabilidad de que una moneda caiga cruz asciende al 50 %, eso significa que obtendremos cruz la mitad de las veces que la lancemos. Sin embargo, semejante razonamiento no puede ser correcto. Imaginemos que vamos al banco y conseguimos una moneda de dos euros recién salida de la fábrica. La tiramos tres veces y obtenemos una cara, otra cara y una cruz. Después, la destruimos. ¿Cuál era la probabilidad de que mi moneda cayera cruz en las ocasiones en que se lanzó? Dado que se trataba de una moneda nueva y sin imperfecciones, quisiéramos creer que esa probabilidad era del 50 %, por más que en los lanzamientos previos solo hayamos obtenido cruz en un tercio de las ocasiones.

Otra posibilidad consiste en afirmar que, si tirásemos la moneda un número suficiente de veces, obtendríamos cruz en la mitad de los casos. Pero esto tampoco puede ser cierto. Incluso con una moneda «justa» —una cuya probabilidad de caer cruz es del 50 %— podríamos obtener *siempre* cruz. Si bien algo así se antoja muy difícil (la probabilidad de que ocurra es $1/2^n$, donde n representa el número de lanzamientos), no deja de ser posible. La razón se debe a que las tiradas no dependen unas de otras: haber conseguido una cruz no torna ni más ni menos probable obtener otra después.

Resulta útil comparar el caso de la moneda con la siguiente situación: imaginemos una urna que contiene cinco bolas rojas y cinco negras. Si extraemos al azar una de ellas, la probabilidad de que se trate de una roja será del 50 %. Supongamos que hemos sacado una bola roja y que la apartamos del resto. ¿Cuál es la probabilidad de que la siguiente bola sea también roja? Ahora no llega al 50 %, sino que se queda en 4/9 (un 44,4 %). ¿Y la probabilidad de que, después, obtengamos otra? Menor aún: 3/8 (37,5 %). ¿Y la de que las primeras seis bolas sean rojas? Cero. Sin embargo, en el caso de la moneda no existe una «reserva de cruces» que se vaya agotando cada vez que obtenemos una. En cada ocasión, la probabilidad de que caiga cruz será siempre del 50 %, con total independencia de cuántas cruces hayan salido con anterioridad.

La ley de los grandes números

No podemos asegurar que, si una moneda «justa» se lanzase al aire un número suficiente de veces, caería cruz en la mitad de los casos. Pero quizá podamos realizar una afirmación más débil: si efectuásemos un número muy elevado de tiradas, sería *muy probable* que cayera cruz aproximadamente el 50 % de las veces.

Lo anterior sí es cierto. Una versión rigurosa de dicha idea se conoce bajo el nombre de «ley de los grandes números» y constituye un teorema en teoría de la probabilidad. Gracias a esta ley, los casinos pueden garantizar que, con muy alta probabilidad, a la larga ganarán dinero. Aunque de vez en cuando cualquier mesa del casino pierda dinero, si acuden los suficientes jugadores durante un período de tiempo lo bastante prolongado, quedará garantizado que —con una probabilidad muy elevada— las ganancias superarán a las pérdidas.

Por desgracia, la ley de los grandes números no nos proporciona una respuesta definitiva a la pregunta que da título a esta columna, ya que presupone la noción de probabilidad: nos dice que, si la probabilidad de que una moneda caiga cruz asciende al 50 %, *es probable* que, a la larga, el resultado sea cruz en aproximadamente la mitad de las ocasiones.

El principio de indiferencia

Algunas personas han intentado aclarar el concepto de probabilidad utilizando un *principio de indiferencia*. La idea básica resulta muy sencilla. Cuando asignamos a la moneda una probabilidad del 50 % de caer cruz, ello significa que nuestras razones para pensar que obtendremos cruz son exactamente análogas a las que nos permiten concluir que obtendremos cara.

No queda claro, sin embargo, que semejante principio arroje conclusiones coherentes. Imaginemos una fábrica de cubos. Sabemos que la fábrica produce cubos cuyas aristas miden siempre menos de un metro, pero, por lo demás, desconocemos por completo cómo se escogen los tamaños. ¿A cuánto asciende la probabilidad de que el próximo cubo que produzca la fábrica sea uno que mida menos de medio metro de lado?

Podemos esgrimir un argumento basado en el principio de indiferencia. Dado que la distancia entre 0 y 1/2 es la misma que la que existe entre 1/2 y 1, las razones para pensar que la fábrica producirá un cubo de menos de medio metro son las mismas que las que nos pueden hacer creer que será mayor. Del principio de indiferencia se sigue que la probabilidad de que el próximo cubo cuente con menos de medio metro de lado ascenderá al 50 %, y lo mismo para la probabilidad de que sea mayor. (Ignoramos la posibilidad de un cubo cuya arista mida exactamente medio metro, un evento de probabilidad cero.)

Hasta ahora, todo va bien. Pero resulta que el mismo principio conduce a una conclusión diferente si consideramos el *volumen* de los cubos. Al igual que antes,

partimos de la observación de que la distancia entre 0 y 1/2 coincide con la que hay entre 1/2 y 1. Así, las razones para pensar que la fábrica producirá un cubo de menos de 1/2 metros cúbicos (m^3) resultan exactamente análogas a las que nos llevarían a predecir un cubo de más de 1/2 m^3. Del principio de indiferencia se sigue que la probabilidad de que el próximo cubo no exceda 1/2 m^3 asciende al 50 %. De igual manera, la probabilidad de que su volumen supere 1/2 m^3 será también del 50 %.

Pero un cubo con medio metro de arista no ocupa 1/2 m^3, sino $(1/2)^3 = 1/8$ m^3. Los cubos con menos de medio metro de lado solo representan una fracción de los cubos cuyo volumen es inferior a 1/2 m^3. Por tanto, si la probabilidad de que el próximo cubo ocupe menos de 1/2 m^3 asciende al 50 %, la de que su arista no exceda medio metro ha de ser inferior al 50 %, un resultado que contradice nuestra primera conclusión.

Quizás exista una versión del principio de indiferencia que nos permita evitar problemas como el anterior. Pero la moraleja de la fábrica de cubos apunta a que los principios de indiferencia se muestran peligrosos. Tal vez nos ayuden a aclarar el concepto de probabilidad en algunos casos, pero no parece que nos vayan a permitir llegar al fondo del asunto.



¿Y ahora, qué?: Una máquina fabrica cubos cuya arista es inferior a un metro, pero desconocemos por completo cómo se escogen los tamaños. ¿Cuál es la probabilidad de que el próximo cubo cuente con menos de medio metro de lado? Parece natural pensar que la respuesta correcta es el 50 %. Considere ahora la probabilidad de que el volumen del siguiente cubo sea inferior a medio metro cúbico y razone de la misma manera. ¿Se muestra el resultado compatible con la respuesta anterior?

Fuerza y simplicidad

Cuando nos decantamos por una teoría, perseguimos dos fines al mismo tiempo. Por un lado, deseamos que la teoría sea *fuerte*: que nos proporcione la máxima información posible. Por otro, ha de tratarse de una teoría *simple*: queremos que la información se articule de manera breve y sistemática.

Una teoría que consistiese en una enorme lista que detallase lo que sucede en todo momento en cada rincón del universo sería extraordinariamente fuerte, pero nada simple. Por su parte, una teoría cuyo único principio fuese «2 + 2 = 4» gozaría de una enorme simplicidad, pero aportaría escasa información. Nuestras mejores teorías encuentran un justo compromiso entre fuerza y simplicidad. Nos permiten obtener gran cantidad de información a partir de principios simples y, por tanto, manejables.

En mi opinión, la mejor manera de entender el concepto de probabilidad es como una herramienta para hallar ese punto medio. Imaginemos que alguien lanza una moneda y que deseamos predecir el resultado. Una manera de obtenerlo sería a partir de una teoría determinista. Ello requeriría tomar nota de todas las fuerzas que experimentará la moneda —el impulso inicial, una pequeña brisa que entra por la ventana, el rebote que resultará del primer impacto contra la mesa— y efectuar el cálculo correspondiente. En principio, tal procedimiento determinaría de manera concluyente el resultado (al menos, si ignoramos los fenómenos cuánticos). Pero, en la práctica, algo así queda fuera de nuestro alcance. No disponemos de toda la información y, aunque esta obrase en nuestro poder, el cálculo resultaría demasiado complejo como para llevarlo a cabo en un tiempo razonable.

La alternativa consiste en utilizar una teoría probabilista y afirmar, por ejemplo, que la probabilidad de obtener cruz es del 50 %. Una teoría así resulta mucho menos fuerte ya que proporciona menos información que la teoría determinista, pero goza de la simplicidad suficiente como para ponerla en práctica.

Dado que una teoría probabilista no nos informa de manera concluyente acerca del resultado, su uso se ve restringido: no nos sirve para predecir si la moneda caerá cruz. Pero eso no la convierte en absoluto en una teoría inútil. Gracias a ella, podemos concluir que sería una buena idea aceptar una apuesta en la que ganaremos dos euros si la moneda cae cara y perdemos uno si cae cruz.

¿Cómo saber si una teoría probabilista es verdadera? Supongamos que alguien lanza la moneda 100.000 veces y comprobamos que solo el 31 % de las ocasiones obtenemos cruz. Si la probabilidad de que la moneda caiga cruz fuese del 50 %, algo así se antojaría extremadamente difícil, por lo que tendríamos muy buenas razones para dudar de la teoría. En cambio, si observásemos que el 50,023 % de las 100.000 ocasiones el resultado es cruz, podríamos confiar en ella.

PARA SABER MÁS

Philosophical papers (volumen 2). D. Lewis. Oxford University Press, 1987.



JULIO CÉSAR: TEXTOS, CONTEXTOS Y RECEPCIÓN. DE LA ROMA CLÁSICA AL MUNDO ACTUAL.

Dirigido por Antonio Moreno Hernández. Estudios de la UNED. Universidad Nacional de Educación a Distancia; Madrid, 2010.

Todo sobre César

Obra y figura

Este amplio y complejo volumen recoge las ponencias y comunicaciones de un gran Congreso celebrado en la UNED en 2008 sobre la vida y la figura de César. Un gran Congreso por el número de centros, organismos y universidades representados, pero, sobre todo, por la amplitud de los temas tocados. «Todo sobre César», podrían titularse el simposio y el libro.

La organización de la obra se explica en la introducción firmada por Antonio Moreno. De los seis capítulos, el primero contiene estudios sobre el género de los *Commentarii* y de elementos de los mismos; el segundo se ocupa de la tradición textual de los *Commentarii*; el tercero habla de «Historia, Política y Derecho», esto es, intenta responder a la pregunta central, «¿quién fue verdaderamente César?», y sobre César en la Literatura latina. Todo ello es, en definitiva, un conjunto de estudios de base filológica sobre las obras de César y el hombre César vistos por nosotros o visto por los escritores latinos.

Comienzo por el capítulo I, de Eustaquio Sánchez Salor, referente al género historiográfico de los *Commentarii*. Sobre la base de textos de Cicerón y Sempronio Aselión, es un derivado en el siglo I a.C. del género de las *Historiae*; es decir, una exposición coherente de los hechos y de los planteamientos de los protagonistas, con intención, también, de incitar a los lectores a la defensa y al apoyo patriótico del pueblo romano. La nota distintiva del género es que el escritor es el protagonista, lo que lo condiciona todo. Solo echo de menos una referencia a los precedentes griegos, por ejemplo las *Efemérides* de Ptolomeo Soter, en la que el sucesor de Alejandro relataba sus propias campañas.

Encontramos también en esta parte información sobre aspectos concretos, así como un estudio de César Chaparro sobre las arengas militares. Buen estudio de retórica, pero también aquí me gustaría leer algo sobre los precedentes griegos en Tucídides y otros historiadores.

Y reviste importancia el estudio de Jesús Luque sobre el septenario trocaico, presente, como se sabe, en los versos satíricos lanzados a César en su triunfo.

Diferente es el tema del capítulo II sobre la tradición textual de los *Commentarii*. Aquí encontramos varios estudios sobre las más antiguas ediciones de César: los comentarios de Giovanni Giocondo a la edición aldina de 1513 (por Antonio Moreno), el estudio del *Leidensis Voss. Lat.* F 90 (por Ana José García Villena) y el de una familia de manuscritos copiados en el entorno de Íñigo de Ávalos, en Milán, en la primera mitad del siglo XV. Son todos artículos importantes para una parte de los *recentiores* de César.

E importantes son los artículos del capítulo III, entre ellos los dos primeros, de Gregorio Hinojo y Manuel Jesús García Garrido sobre, respectivamente, la visión política de César y su valor en calidad de legislador y orador. Como estos autores y otros más reconocen, resulta difícil o imposible decidir sobre las ideas y proyectos de gobierno de César, que seguramente estaban sin decidir plenamente en el momento de su muerte. Aun así, hay cosas indicativas sobre su modo de pensar. Y hay que entender que la postura de Augusto sobre el tema pudo cambiar una vez muerto César. En líneas generales, puede decirse que su posición antisilana y a favor de los *populares* fue temperada por su *clementia* y su prudencia política. Creía que *optimates* y *populares* eran más bien coaliciones electorales que partidos políticos.

No distan mucho las posiciones de García Garrido. Considera a César como un precursor del *principatus*, con la rotura del antiguo modelo republicano. Analiza también la importancia de sus defensas y acusaciones en las causas de Dolabela y Cayo Rabirio.

Sigue un estudio de Javier Cabrero sobre la política belicista y las campañas de César en Hispania durante su cuestura, pretura y el período intermedio. Insiste en su campaña en el Noroeste y su importancia para sus aspiraciones al consulado.

La Parte IV se refiere a César en la Literatura latina. Dos trabajos de José Carlos Fernández Corte y de Dulce Estefanía se ocupan, respectivamente, de la presencia de César en Catulo y del influjo de este en Horacio; y a la presencia o ausencia de César en *Aen.* I 286-96. Se sabe que *Caesar* puede referirse ya a César ya a Augusto. Cree que hay primero una referencia a César, luego una a Augusto. Hay influjo en Horacio, también en Ovidio.

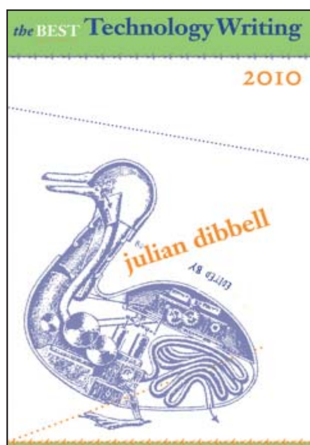
Cierra esta parte un artículo de Juan Lorenzo sobre «la imagen de César deformada por Lucano». Versa sobre el tratamiento usualmente dado a César en los poetas latinos y se corresponde con la posición antitiránica del poeta y su elogio de Catón. Yo propondría un tratamiento de César paralelo al de Alejandro, sobre el cual hay en las fuentes una escisión comparable. La *clementia Caesaris* es sustituida por la *crudelitas*.

Las partes quinta y sexta, sobre la recepción de César en la Modernidad, se refieren no tanto a la visión de César por filólogos e historiadores actuales como a la de escritores y poetas que van de Roma al Renacimiento y al mundo contemporáneo. Este doble planteamiento es frecuente hoy día. Y resulta aceptable siempre que se tenga en cuenta que se trata de dos cosas distintas. En la primera, los autores de cada estudio, amplio o referente a algún detalle, exponen lo que consideran que es científicamente cierto, acompañado de las dudas que se les presentan; en el segundo, se trata de los que llamaríamos ensayos literarios o poéticos escritos en determinadas circunstancias. Aunque pueden, por supuesto, ayudar al filólogo o historiador a hallar una idea o interpretación que luego habrá de contrastar. Estos también pueden ser influidos por prejuicios o presunciones que le restan objetividad. En definitiva, ciencia y literatura son cosas distintas. Filólogos e historiadores, por un lado, y escritores y poetas, por otro, son personalidades humanas diferentes.

La Parte V, del Renacimiento a la Ilustración, comienza con un texto de Virginia Brown sobre el Renacimiento en general. Sigue otro de José Ignacio Velázquez sobre la Literatura francesa. Y varios sobre temas particulares. Señalo solo el

verdaderamente ilustrativo de Antonio Ballesteros sobre el *Julio César* de Shakespeare, que refleja el convulso ambiente subversivo de la Inglaterra isabelina: César sería el equivalente de Essex; pero me parece un tanto extravagante el «proceso de feminización» de César.

Tras el sexto y último bloque, dedicado a César en el mundo contemporáneo, el libro termina con un apéndice especialmente novedoso, obra de Antonio Moreno, sobre César en España y su recepción también en España: manuscritos, estudios, traducciones, etcétera. Excelente libro, en suma. —*Francisco Rodríguez Adrados*



THE BEST TECHNOLOGY WRITING 2010.
Compendiado por Julian Dibbell. Yale University Press; New Haven, 2010.

La técnica en la vida diaria

Compilación de artículos magistrales

No son los artículos más sobresalientes en el dominio de la técnica, sino los mejor escritos e inteligibles por el lector común. No están, pues, sacados de revistas especializadas, sino de publicaciones generalistas. Obra de genuinos periodistas científicos con una pluma bien cortada, una mente ágil y rigor en la exposición. Comparten el interés humano del tema abordado, más allá de la aplicación práctica en la vida diaria. El compilador pertenece a la redacción de *Wired*, adscripción que se refleja en la selección de temas y autores.

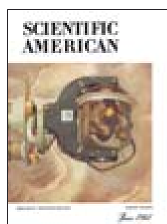
Detengámonos, por ejemplo, en el artículo «Baby Food», de Jill Lepore. Sobre las idas y venidas del amamantamiento y la lactación artificial. Cuando Linneo sustituyó en su magistral *Sistema Naturae* de 1758 la tradicional denominación de *Quadrupedia* por *Mammalia*, su mujer daba el pecho a uno de sus hijos. El naturalista abanderaba por entonces la defensa de la lactación materna que remplazara a la figura extendida de la nodriza. En su alegato llegó a considerar el amamantamiento por amas de cría un crimen contra la naturaleza. Otra coincidencia, ahora de sentido contrario, se produjo en las postrimerías del siglo XIX: corrió la idea de que las mujeres norteamericanas tenían problemas de glándula mamaria en el momento en que aparecieron los primeros productos comerciales de alimentación infantil. La leche de vaca se convirtió en la nueva nodriza. Se denostó el amamantamiento, considerado una función de mujeres negras. Los teóricos de las razas añadían más pólvora: cuanto más blanca es la madre, menos nutritiva es su leche. La primera patente estadounidense de botella de leche materna se concedió en 1841. Presentaba forma de pecho, que fue cambiando con los años. Además, se hizo más frecuente el parto hospitalario, lo que permitía que los prematuros sobreviviesen y se dispusiese de leche suficiente en caso de que la criatura fuera incapaz de succionar. Pero el amamantamiento resurgió con la invención del succionador. En 1910, Francis Parkman Denny, microbiólogo, demostró la función bactericida de la leche materna y creó un succionador fundado en el mecanismo del aparato de ordeño. En 1997, la Academia Norteamericana de Pediatría declaraba que la leche materna era «específica de la especie» y la recomendaba como alimento exclusivo para los seis primeros meses de vida, mezclada luego con alimentos sólidos hasta que el bebé cumpliera por lo menos un año. El artículo concluye con una revisión de los últimos modelos de succionadores.

Espigando otro botón de muestra, la máquina de pensar, la construcción de una computación que abarque el caos propio de la mente humana. El protagonista de la historia es Kwabena Boahen, ghanés de los aledaños de Accra que tenía 16 años cuando se entusiasmó con el mundo digital, en 1981. Su padre le había traído de Inglaterra el primer computador de la familia. El adolescente lo colocó sobre una mesa del porche, donde solía desmantelar radios y construir pistolas de aire. Enchufó el ordenador a un televisor, para aprovechar su pantalla y un registrador para almacenar programas. Muy pronto creó un programa de ping-pong. Avanzar la partida un píxel de la pantalla requería miles de unos y ceros, generados por transistores que se abrían y cerraban 2,5 millones de veces por segundo. Boahen esperaba que hubiera elegancia en el corazón de su ordenador y se había encontrado con una burocracia liliputiense de código binario. Aquello era pura fuerza bruta. Y soñó en dar con una mejor solución. En su logro labora, convertido en científico de prestigio en la Universidad de Stanford. Se afana por construir un computador de nuevo cuño que no se base ya en el orden rígido de los chips de silicio tradicionales, sino en el caos organizado del cerebro humano. Con la ventaja añadida de que nuestro cerebro consume 20 vatios de potencia; el computador de nuestra mesa, un millón de veces más de energía. Boahen trabaja en el perfeccionamiento de una oblea para un supercomputador neural, el Neurogrid, con millones de transistores; contiene un capacitador que rinde al mismo voltaje que las neuronas.

Para cerrar la selección, la carrera contra la falsificación de moneda. Albert Talton fue uno de los falsificadores de moneda más prolíficos de la historia de Estados Unidos. «Acuñó» millones de dólares con materiales comprados en el comercio. Había estudiado ingeniería eléctrica en la Universidad de California. Tras varios éxitos en productos de ingeniería inversa, cuando un jefe suyo le enseñó un billete falso de 50 dólares en 2004, con el que le habían pagado un trabajo, Talton le repuso: «Yo podría hacerlo mucho mejor». Todas las monedas se fabrican con la intención de que no resulte fácil su copia. Las libras británicas se imprimen en papel elaborado con una mezcla de fibra de algodón y tela de lino; los billetes de euros, sobre 100 por cien de algodón; los dólares americanos, sobre 75 por ciento de algodón y 25 por ciento de lino. Talton descubrió un perfecto sustituto en la pulpa del papel reciclado. Con dos computadores HP, nueve impresoras y papel. Al alcance de cualquiera. Cuando fue aprehendido había ya puesto en circulación casi siete millones de dólares.

—*Luis Alonso*

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Junio 1961

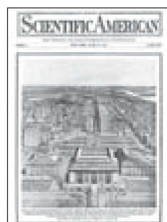
Máser óptico

«Todas las fuentes luminosas estándar provocan, en esencia, un ruido inadecuado para las aplicaciones que no sean de señalización tosca. Solo desde hace un año, con la aparición del máser óptico, ha sido posible el control preciso de la generación de ondas luminosas. Aunque los máseres ópticos todavía representan una novedad, ya han rendido unos haces luminosos muy intensos y fuertemente direccionales. Esos haces son mucho más monocromáticos que los de otras fuentes luminosas; en el mejor de los casos, los máseres ópticos compiten con los mejores osciladores electrónicos como fuentes de monofrecuencias. Su desarrollo avanza tan deprisa que pronto podrían estar listos para las aplicaciones más variadas.
—Arthur L. Schawlow»

Este dispositivo se conoce hoy como láser. Schawlow fue uno de los tres galardonados con el premio Nobel de Física en 1981.

Genes víricos

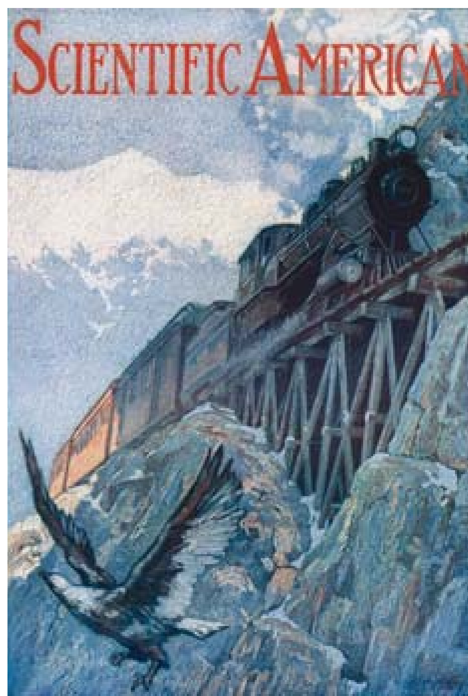
«Hace menos de un decenio no cabía ninguna duda de que la genética vírica y la genética celular correspondían a dos disciplinas diferentes, bien delimitadas. Vemos ahora que es sumamente difícil establecer una distinción entre la genética vírica y la no vírica, hasta el punto de que incluso el significado de esa distinción resultaría objetable. De hecho, parece existir toda clase de estructuras intermedias entre la estructura genética "normal" de una bacteria y la de un virus bacteriano típico. Descubrimientos recientes en nuestro laboratorio han demostrado la enorme identidad de fondo que comparten ciertos fenómenos en otros tiempos considerados inconexos. —Fançois Jacob, André Lwoff y Jacques Monod»



Junio 1911

La ciencia de la ineptitud

«Desde que el difunto Sir Francis Galton creó la ciencia de la eugenesia, que, en sentido literal, significa "buena crianza", los estudiantes de ciencia de la humanidad, los directores de asilos y hospitales para dementes y los criminólogos de todo el mundo han venido recopilando datos estadísticos para demostrar no solo el peligro de permitir los matrimonios entre criminales, lunáticos e individuos físicamente ineptos, sino el efecto de tales uniones sobre la humanidad. Por fortuna, las asociaciones eugenésicas del país y del extranjero han hecho un gran esfuerzo para despejar los prejuicios populares que inevitablemente se encuentran en tal labor educativa y preparar el terreno para la acción legal.»



El camino de hierro: Construcción de ferrocarriles para la libre circulación de mercancías y personas por todo un continente, 1911.

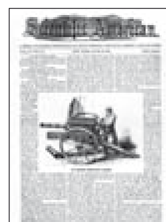
SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CIV, N.º 24; 17 DE JUNIO DE 1911

Un país de ferrocarriles

«Los primeros ferrocarriles transcontinentales que atravesaron los desiertos y montañas occidentales de EE.UU. se construyeron más por razones militares y políticas que con la esperanza de obtener unas ganancias inmediatas y suficientes que compensaran la enorme inversión que supuso su construcción. Dado que los inversores privados no eran propicios a la filantropía, el gobierno tuvo que incentivarlos para que invirtieran su dinero; por ello les ofreció tierras y subsidios, y les cedió la explotación de siete de las líneas más importantes. Hoy la competencia entre esas siete líneas, tanto para el transporte de carga como para el de pasajeros, es muy intensa.»

Manto global

«Svante Arrhenius ha propuesto una ingeniosa teoría que explica los períodos de glaciación que han marcado varias etapas de la historia geológica. Según los experimentos de Langley, el dióxido de carbono y el vapor de agua que contiene la atmósfera son más opacos a las rayos calóricos de gran longitud de onda que emite la Tierra que a las ondas de longitudes diversas que emite el Sol. Deduce Arrhenius que un incremento de las concentraciones de dióxido de carbono y de vapor de agua de la atmósfera aumentarán la protección del planeta frente al enfriamiento y, por tanto, harán ascender la temperatura de su superficie. La teoría supone que la atmósfera terrestre durante los períodos glaciales era pobre en dióxido de carbono y vapor de agua, mientras que en los períodos cálidos era rica en esos gases.»



Junio 1861

La guerra y el Rey Algodón

«En tiempo reciente publicamos un artículo sobre la guerra y el algodón donde exponíamos nuestra convicción de que, si el conflicto se prolongaba, marcaría el final del predominio de los estados algodoneros en el abastecimiento de esa importante materia prima. Por nuestro aserto, uno o dos suscriptores de esos estados están denunciándonos como enemigos del Sur. Al final se evidenciará, cuando los hechos hoy en curso hayan llegado a una solución práctica, que quienes han empujado al Sur a la revolución habrán hecho más para desarraigar sus instituciones que todos los alborotadores abolicionistas que pudieran existir en el país. Creemos firmemente que los intereses de siempre de los estados algodoneros están asegurados solo dentro de la Unión.»



ENERGÍA

Siete soluciones innovadoras

VV.AA.

La tasa de fallos podría ser del noventa por ciento, pero si alguna de estas insólitas técnicas resultara, mejoraría la seguridad y la eficiencia energéticas.



MEDICINA

Una vía rápida para la obtención de vacunas

Alan Aderem

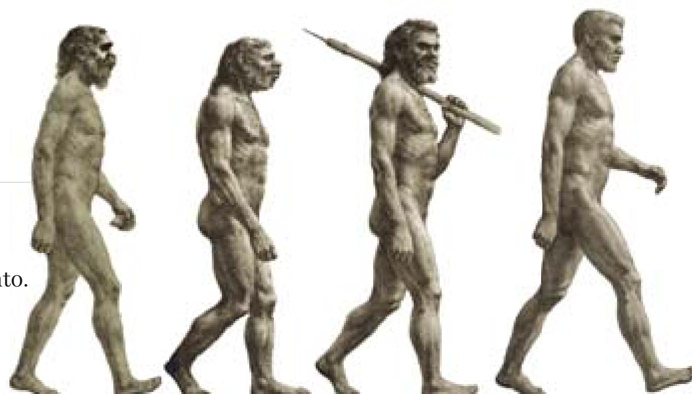
El análisis simultáneo de todas las facetas del sistema inmunitario acelera el diseño de vacunas y puede que algún día aseste un golpe definitivo al sida.

MATEMÁTICAS

Los números más singulares en la teoría de cuerdas

John C. Baez y John Huerta

¿Por qué nuestro universo podría tener diez dimensiones? Un olvidado sistema numérico, inventado en el siglo xix, podría contener la respuesta más simple.



EVOLUCIÓN HUMANA

El falso mito sobre nuestro origen

John J. Shea

No llegó primero la apariencia física y luego el comportamiento. *Homo sapiens* evolucionó una sola vez.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Yago Ascasibar: *La inflación a debate*; Luis Bou: *La neurociencia en el sistema judicial*, *Conmemoración de los Nobel* y *Apuntes*; Fabio Teixidó: *¿Sobrevivirá el mar Muerto?*; Juan Manuel González Mañas: *Conmemoración de los Nobel*, *El caos ordenado de las proteínas* y *Apuntes*; Yolanda Rigault: *La dama de Cao*; Joandomènec Ros: *Un depredador nato* y *Apuntes*; Xavier Roqué: *Historia de la ciencia*; Bruno Moreno: *Foro científico* y *Apuntes*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; Mercè Piqueras: *Apuntes*; J. Vilardell: *Hace...* y *Apuntes*

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España